

VARIAÇÕES TEMPORAIS DA COESIVIDADE ENTRE AGREGADOS DE SOLO

Luiz Renato D'Agostini\*

Tese apresentada como um dos requisitos para obtenção do Grau de Doutor em Ciência do Solo, Programa de Pós-graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Porto Alegre

Junho, 92

\* Engº Agrº - UFPel - Professor da UFSC

CIP - CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO

D127v D'Agostini, Luiz Renato  
Variações temporais da coesivida  
de entre agregados de solo / Luiz  
Renato D'Agostini. - Porto Alegre :  
UFRGS, 1992.  
xv, 82f. : il.

Tese (Doutorado) - Universidade Fe  
deral do Rio Grande do Sul. Programa  
de Pós-Graduação em Agronomia-Ciência  
do Solo, Porto Alegre, 1992.

1. Mecânica do solo. 2. Compactação  
do solo. 3. Saturação : Solo. 4. Físi-  
ca do Solo. I. Título.

CDD: 631.43  
CDU:631.43(043.3)

Catálogo na publicação: Biblioteca  
Setorial da Faculdade de Agronomia  
da UFRGS.

LUIZ RENATO D'AGOSTINI

Engº Agrº MSc - (UFSC)

TESE

Submetida como parte dos requisitos  
para obtenção do Grau de

DOUTOR EM CIENCIA DO SOLO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

FACULDADE DE AGRONOMIA

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

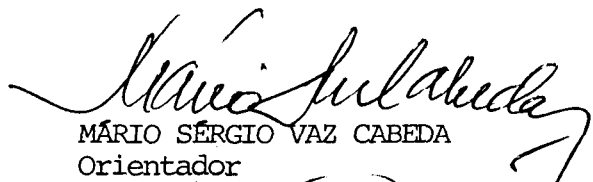
PORTO ALEGRE (RS), BRASIL

Aprovado em: 30.06.1992

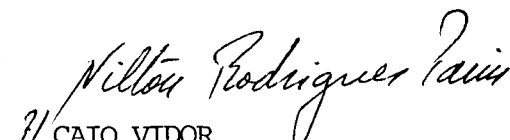
Pela Banca Examinadora

Homologada em: 14.07.1992

Por:



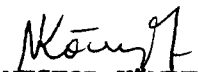
MÁRIO SÉRGIO VAZ CABEDA  
Orientador



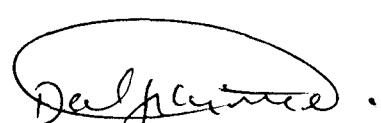
CAIO VIDOR  
Coordenador do Programa de  
Pós-Graduação em Agronomia



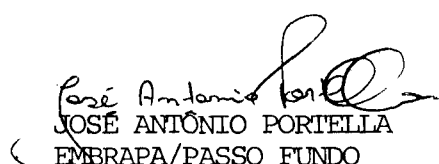
NEROLI PEDRO COGO




NESTOR KAMPF



DALVAN JOSÉ REINERT  
UFSM



JOSÉ ANTÔNIO PORTELLA  
EMBRAPA/PASSO FUNDO



EMA MAGALHÃES LEBOUTÉ  
Diretora da Faculdade de  
Agronomia

## Agradecimentos

A todos, mas especialmente

à Diva e aos meus filhos Tiago e Caio, respectivamente  
pelo mais belo e o mais profundo sentimento que é para  
mim possível perceber;

ao Prof. Cabeda, por mais dispor-se a compreender-me  
como orientando de que fazer-se notado como orientador

ao Luciano, pelo exemplar colega e amigo.

# VARIAÇÕES TEMPORAIS DA COESIVIDADE ENTRE AGREGADOS DE SOLO\*

Autor: Luiz Renato D'Agostini

Orientador: Professor Mário Sérgio Vaz Cabeda

## RESUMO

O solo apresenta resistência à compressão proposta como dependente de características mecânicas de seus agregados e de processos de manifestação de coesividade entre eles. Compressão e características de agregados afetam, por sua vez, esses processos.

Propõem-se conceitos e expressões de resistência coesiva do solo, e métodos de verificá-la. No estudo de relações tensão-deformação-resistência em sistema de agregados resultantes de solo compactado e fragmentado são considerados os efeitos do tempo, de tensões de contato, dureza dos agregados e do grau de orientação de partículas nos mesmos.

Um elevado grau de orientação de partículas no contato agregado-agregado eleva a taxa de reorientação e o valor absoluto da resistência do sistema macroparticulado, mas também eleva a taxa de perda de sua propriedade de absorver e transformar tensão em resistência à fratura.

Os conceitos de coesividade propostos são aplicados à lei de Mohr-Coulomb e são apresentados em expressões e interpretações análogas às dessa lei, numa tentativa de contemplar a relação temporal nas relações tensão-deformação e resistência de solo, quando sujeito a repetidas fragmentações e carregamentos.

---

\* Tese de Doutorado em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre (82p.) - junho, 1992

# SOIL INTERAGGREGATE COHESIVENESS AND ITS TIME DEPENDENCE\*

Author: Luiz Renato D'Agostini

Adviser: Professor Mário Sérgio Vaz Cabeda

## SUMMARY

Soil presents compressive strength proposed as dependent on mechanical characteristics of its aggregates and on processes leading to interaggregate cohesiveness. Compression and aggregate characteristics affect, in their way, those processes.

Soil cohesive strength is conceptualized, and mathematical expressions, as well as, methods for its verification, are proposed. Time effects, aggregates interfacial stresses, aggregates hardness and degree of particle orientation are considered in stress-strain-cohesive strength studies involving aggregates from compacted and subsequently fragmented soil.

A high degree of particle orientation in aggregate-aggregate contacts increases the particle reorientation rate, as well as the soil strength, but increases, otherwise, the soil loss rate in absorbing and transforming stress in cohesive strength.

The proposed soil cohesive strength concepts are presented in expressions and interpretation analogous to the rules set by the Mohr-Coulomb law, as an attempt in describing time effects on stress-strain-cohesive strength relations, when the soil is subjected to repeatedly compressive stresses and fragmentation.

-----  
\* Doctorate Thesis in Soil Science, School of Agronomy,  
Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre  
(82p.) - June, 92

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
2.1. Tensão de compressão e estrutura do solo .....	4
2.2. Características de agregados de solo submetido a tensões e fragmentações .....	6
2.2.1. Características edáficas de agregados densos .....	8
2.2.2. Características mecânicas de agregados densos .....	11
3. DESENVOLVIMENTO TEÓRICO .....	14
3.1. Coesividade do solo .....	14
3.2. Relações tensão-deformação-resistência do solo como um sistema macroparticulado .....	16
3.3. Fatores e mecanismos de recomposição da coesi- vidade entre agregados do solo .....	25
3.3.1. Detecção de mecanismos predominantes ...	30
4. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL .....	38
4.1. Solo .....	38
4.2. Obtenção de agregados compactados .....	39
4.3. Condicionamento do solo para fratura por tração	41
4.4. Condicionamento do solo para fratura por com- pressão .....	45
4.5. Determinações .....	46
4.5.1. Fratura por tração .....	46

4.5.2. Fratura por compressão .....	46
5. DISCUSSÃO DE RESULTADOS .....	50
5.1. Transformação de tensões de compressão em re- sistência coesiva do solo .....	50
5.2. Mecanismos de recomposição espontânea de resis- tência coesiva do solo .....	60
6. UMA EXTENSÃO DA RELAÇÃO TEMPORAL DA COESIVIDADE E SUAS RELAÇÕES COM A COMPRESSÃO E RESISTÊNCIA DO SOLO .....	67
7. CONCLUSÕES .....	77
8. BIBLIOGRAFIA CITADA .....	78
9. APÊNDICES .....	80



## RELAÇÃO DE SÍMBOLOS

$A_c$  = área de contato aparente ( $L^2$ );

$A_{ce}$  = área de contato efetivo ( $L^2$ );

$A_{ce1}$  = área de contato efetivo inicial;

$A_{ce1}$  = área de contato efetivo por rearranjo de macropartículas;

$A_{ce2}$  = área de contato efetivo por rearranjo de micropartículas;

$S$  = tração média entre partículas em área de contato efetivo ( $F$ );

$S_1$  = tração  $S$  inicial;

$S_1$  = tração  $S$  por pressão negativa de água;

$C=A_{ce}.S$  = resistência coesiva; produto coesivo; coesividade ( $F/L^2$ );

$A_{ce0}.S_0$  = produto coesivo original; coesividade original ( $F/L^2$ );

$\sigma$  = tensão de compressão; tensão compressiva de fratura ( $F/L^2$ );

$d[A_{ce}.S](\sigma)/d\sigma$  = incremento infinitesimal de produto coesivo derivado de tensão de compressão  $\sigma$  em função de tensões  $\sigma$ ;

$D_{s1}$  = densidade do solo de  $1,73g/cm^3$ , compactado com energia de  $0,63 MJ/m^3$  e umidade abaixo da ótima;

$D_{s2}$  = densidade do solo de  $1,88g/cm^3$ , compactado

com energia de  $1,70 \text{ MJ/m}^3$  e umidade abaixo da ótima;

$D_{\text{m3}}$  = densidade do solo de  $1,82 \text{ g/cm}^3$ , compactado com energia de  $1,70 \text{ MJ/m}^3$  e umidade acima da ótima;

$L(\sigma)$  = tensão horizontal derivada de tensão vertical  $\sigma$  ( $\text{F/L}^2$ );

$N$  = tensão de carregamento; tensão de compressão para condicionamento do solo em dado nível de compactidade ( $\text{F/L}^2$ );

$NA$  = não compactado;

$q$  = dureza; resistência à deformação por compressão;

$R_{\text{max}}$  = resistência máxima do solo a uma tensão de compressão  $\sigma$  ( $\text{F/L}^2$ );

$T$  = tensão de tração aplicada a uma amostra de solo ( $\text{F/L}^2$ );

$T_{\text{max}}$  = tração máxima aplicável por seção de amostra;

$\Delta[Ace](N)$  = incremento de área de contato efetivo em função de tensão de condicionamento  $N$ ;

$\Delta[Ace.S](\sigma)$  = incremento de coesividade em função de tensão de compressão  $\sigma$ ;

$\Delta[Aceo.So](t)$  = incremento de coesividade original em função do tempo;

$\Delta[S](N)$  = incremento de tração  $S$  em função de tensão

de condicionamento N;

$\phi$  = ângulo de atrito; coeficiente cinético de propensão ao rearranjo de micropartículas;

$\sigma_v$  = tensão de compressão vertical ( $F/L^2$ );

$\sigma_h$  = tensão de compressão horizontal; tensão de compressão de confinamento ( $F/L^2$ );

$\tau$  = tensão de cisalhamento ( $F/L^2$ );

## RELAÇÃO DE TABELAS

1. Densidade do solo compactado a diferentes umidades  
e em diferentes energias de compactação ..... 40

## RELAÇÃO DE FIGURAS

1.	Amostra de solo sob tração T; área de contato aparente $A_c$ ; área de contato efetivo $A_{ce}$ .....	15
2.	Amostra de solo em fratura por compressão e transmissão e decomposição da tensão $\sigma$ .....	17
3.	Transformação de energia compressiva em produto $A_{ce}.S$ .....	19
4.	Relação temporal de produto coesivo derivado de tensões de compressão $\sigma$ entre agregados .....	22
5.	Relação temporal de produto coesivo derivado de tensões de compressão $\sigma$ entre agregados com diferentes densidades .....	23
6.	Relação temporal de produto coesivo derivado de tensões de compressão $\sigma$ entre agregados de mesma densidade, mas oriundos da fragmentação de solo compactado em condições de umidade acima e abaixo da ótima .....	24
7.	Estabelecimento de contato efetivo por microrrearranjo .....	27
8.	Tensões de tração máxima aplicável a uma amostra de solo imediatamente após o sua fragmentação e condicionamento sob tensão compressiva $N$ .....	31
9.	Incremento de tensão de tração máxima aplicável a uma amostra de solo, por da intensificação de tração em contatos efetivos estabelecidos quando	

do condicionamento sob tensão N .....	32
10. Incremento de tensão de tração máxima aplicável na fratura de uma amostra de solo, predominantemente em função do incremento da área de contato efetivo por rearranjo de agregados .....	33
11. Incremento de tensão de tração máxima aplicável na fratura de uma amostra de solo, predominantemente em função do incremento de área de contato efetivo por microrrearranjo de partículas .....	34
12. Relação entre tensões de tração máximas aplicáveis na fratura de uma amostra de solo a tempos $t > 0$ e $t = 0$ , com predominância de fortalecimento de trações em área de contato efetivo estabelecida quando do condicionamento .....	35
13. Relação entre tensões de tração máximas aplicáveis na fratura de uma amostra de solo a tempos $t > 0$ e $t = 0$ , com predominância de incremento de coesividade por rearranjo de agregados .....	36
14. Relação entre tensões de tração máximas aplicáveis na fratura de uma amostra de solo a tempos $t > 0$ e $t = 0$ , com predominância de incremento de coesividade por microrrearranjo de partículas ...	37
15. Densidade do solo em função do teor de umidade e dois níveis de energia de compactação .....	39
16. Corte esquemático de recipiente para condicionamento e incubação do solo .....	43

17.	Aplicação de tensões de pré-carregamento de condicionamento do solo .....	44
18.	Corte esquemático de equipamento para submeter a amostra de solo à fratura por tração .....	47
19.	Corte esquemático de equipamento para submeter a amostra de solo à fratura por compressão .....	49
20.	Razão de incrementos de produto coesivo derivado de tensão $\sigma$ por unidade dessa, aplicada na promoção de fratura do solo a tempos $t=0$ e $t>0$ .....	51
21.	Variação temporal de índice de transformação de de tensão $\sigma$ em produto coesivo Ace.S em diferentes condições de agregados .....	53
22.	Incremento de tensão de tração máxima aplicável a uma amostra de solo composta de agregados originados na fragmentação de blocos com densidade $D_{s1}=1,73 \text{ g/cm}^3$ e $D_{s3}=1,82 \text{ g/cm}^3$ , e previamente submetida a compressões confinadas $N_1=0,20\text{kgf/cm}^2$ e $N_2=0,50\text{kgf/cm}^2$ .....	62
23.	Razão entre tensões de tração máximas aplicáveis a um tempo $t > 0$ e $t = 0$ em amostra de solo composta de agregados originados na fragmentação de blocos com densidade $D_{s1}=1,73 \text{ g/cm}^3$ e $D_{s3}=1,82\text{g/cm}^3$ , previamente submetida a compressões $N_1=0,20\text{kgf/cm}^2$ e $N_2=0,50\text{kgf/cm}^2$ .....	62
24.	Incremento de tensão de tração máxima aplicável a uma amostra de solo composta de agrega-	

dos originados na fragmentação de blocos com densidade $D_{s1}=1,73 \text{ g/cm}^3$ e $D_{s2}=1,88 \text{ g/cm}^3$ , previamente submetida a compressões confinadas $N_1=0,20 \text{ kgf/cm}^2$ e $N_2=0,50 \text{ kgf/cm}^2$ .....	83
25. Incremento de tensão de tração máxima aplicável a uma amostra de solo composta de agregados não compactados (NA) e agregados originados na fragmentação de blocos com densidade $D_{s2}=1,88 \text{ g/cm}^3$ , e previamente submetida a compressões confinadas $N_1=0,20 \text{ kgf/cm}^2$ e $N_2=0,50 \text{ kgf/cm}^2$ .....	85
26. Incremento de tensão de tração máxima aplicável a uma amostra de solo composta de agregados originados na fragmentação de blocos com densidade $D_{s2}=1,88 \text{ g/cm}^3$ e $D_{s3}=1,82 \text{ g/cm}^3$ , previamente submetida a compressões confinadas $N_1=0,20 \text{ kgf/cm}^2$ e $N_2=0,50 \text{ kgf/cm}^2$ .....	85
27. Círculos de Mohr definindo trajetória de tensões de ruptura de Mohr e trajetórias de tensões de fratura de Mohr-Coulomb .....	88
28. Curvas análogas à trajetória de tensões de fratura de Mohr-Coulomb, quando relações temporais da coesividade são consideradas .....	73



## 1. INTRODUÇÃO

As tensões de compressão aplicadas ao solo pela crescente mecanização agrícola têm sido um importante fator de sua degradação estrutural do solo.

Boas condições físicas do solo para o crescimento de plantas significam essencialmente adequadas relações volumétricas e boa distribuição espacial entre as fases líquida, sólida e gasosa. Essas condições se traduzem em equilibrados volumes de poros com diferentes diâmetros médios. Poros maiores permitem rápida drenagem do solo por ocasião de chuvas ou irrigação, assegurando suficiente espaço aéreo às trocas de gases, e facilitam a elongação radicular. Poros menores retêm água por mais tempo, assegurando suficiente volume da fase líquida. Crescendo através de poros de variadas dimensões, a raiz estabelece suficientes interfaces com as diferentes fases do sistema, obtendo os efeitos de diversos fatores de crescimento.

A distribuição do tamanho e o arranjo dos agregados determinam as características do espaço poroso de um solo com determinada textura, enquanto a estabilidade do arranjo tem papel fundamental em definir a persistência de dada

distribuição do diâmetro de poros.

Para um solo sujeito a periódicos processos de fragmentação, importante é a dinâmica de seu arranjo estrutural, que deveria ser referida em termos da repetibilidade temporal e espacial e da resistência de um padrão geométrico. Essa repetibilidade e resistência do padrão dependem da resistência do agregado, individualmente, e do restabelecimento de ligações cimentantes entre os mesmos e da resistência dessas ligações.

A estabilidade estrutural de um solo é referida em relação a determinados fatores e, portanto, só tem maior significado quando avaliada frente aos principais fatores que podem desestabilizar o sistema; agregados considerados estáveis por determinados métodos de determinação de estabilidade podem ser altamente sensíveis à ação de forças que não são consideradas ou são inadequadamente simuladas.

Em solos mecanizados, a compressão e a fragmentação representam fatores determinantes do padrão geométrico e de características mecânicas dos agregados da camada arável e, ao mesmo tempo, normalmente restringem a ação dos fatores naturais de agregação. Assim, a persistência do arranjo estrutural de tais solos passa a ser muito dependente das características mecânicas atuais dos seus agregados.

Pressupõe-se que em agregados compactados e com elevado grau de orientação de partículas, além de uma alta resistência mecânica, ocorra forte propensão ao rearranjo dessas partículas para posições de menor energia livre.

Pressupõe-se, também, que o rearranjo de partículas na região interfacial entreagregados seja um processo de recomposição de ligações agregado-agregado após a fragmentação do solo. Então, elevados graus de orientação de partículas em agregados, seja essa orientação decorrente de intensa compactação ou de compactação em unidade elevada, devem intensificar a recomposição de ligações agregado-agregado, que pode ser proposta como uma manifestação de coesividade do sistema macroparticulado.

As condições que podem proporcionar mais rápida e maior recuperação da coesividade do solo como um sistema macroparticulado podem estar presentes nas propriedades de agregados originados pela fragmentação de solo compactado. Uma baixa compressibilidade individual e o estabelecimento de fortes ligações entre agregados podem ser desejáveis na camada arável do solo, uma vez que concorreriam para a estabilização do sistema em condições de alta porosidade, mesmo sob compressão.

Relações temporais da coesividade e relações tensão-deformação-resistência de sistema macroparticulado de agregados originados da fragmentação de solo com diferentes níveis de compactação, são objeto desse trabalho.

Em hipótese, a consolidação entre agregados é significativamente afetada pela resistência mecânica e grau de orientação de suas partículas. Por sua vez, a taxa de consolidação entre agregados afeta significativamente as relações tempo-tensão-deformação do sistema macroparticulado.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Tensão de compressão e estrutura do solo

A agregação do solo decorre da ação de diversos fatores em processos que envolvem relações físicas, químicas e biológicas (HARRIS, et al. 1966). Dentro do sistema de produção agrícola, agregam-se ainda os efeitos do preparo e cultivo.

Os efeitos das operações de preparo e cultivo são muito importantes na definição das características da estruturação e das unidades estruturais (VOORHEES, 1983), sendo que o tráfego pode até mesmo neutralizar os efeitos de um cultivo específico (VOORHEES e LINDSTRON, 1984; LARNEY e FORTUNE, 1986; TERPSTRA, 1989). Assim, possíveis melhorias decorrentes de atividade biológica durante um ciclo de cultura (ROGER e BROWNING, 1948; DALLA ROSA, 1981) são passíveis de profundas perdas ou mesmo de anulação pela ação determinante do tráfego. Em agricultura intensiva e mecanizada, em que a superfície trafegada pode se aproximar do total da área cultivada ao final das operações de um ciclo, a semeadura pode estar sendo feita em solo nem tanto

reestruturado pela ação de plantas, meso e micro-organismos, mas em condições de solo e agregados com características em muito determinadas pelos efeitos do tráfego de máquinas e pela ação de implementos de cultivo. Ainda que durante o ciclo imediatamente anterior tenha havido recuperação estrutural e seus efeitos residuais possam manter-se em algum grau, as condições atuais que a cultura em implantação encontra são altamente dependentes da história de tensões e de outros efeitos do tráfego e preparo antes e após aquela recuperação.

Quanto mais próxima da natural a condição estrutural até antes do tráfego e fragmentação pelo preparo, maiores poderão ser os efeitos residuais em relação àquela condição ao final das operações mecanizadas. Esses efeitos, com origem basicamente na atividade biológica, podem justificar e têm justificado esforços na promoção dos fatores de agregação tradicionalmente reconhecidos. No entanto, condições estruturais de solo que se aproximam das naturais normalmente coincidem com condições de elevada compressibilidade, implicando maiores danos relativos pela ação da compressão pelo tráfego de máquinas e equipamentos.

A compatibilização das vantagens da mecanização com as condições de solo desejáveis às relações solo-planta reclama esforços no sentido de compreender e promover não apenas as condições estruturais convencionalmente entendidas como adequadas às plantas, mas, de forma concomitante, aquelas que condicionem o solo a suportar melhor os efeitos

compressivos da mecanização.

## 2.2. Características de agregados de solo submetido a tensões e fragmentações

Aspectos relevantes das características de sistemas de agregados resultantes de solo submetido a compressões e fragmentações podem ser diversos. Contudo, quase todos aqueles aspectos decorrem das relações volumétricas e da distribuição espacial entre as fases sólida, líquida e gasosa no sistema ou no agregado individualmente. Tradicionalmente, os estudos são voltados às características atuais dos agregados, como estabilidade em água e distribuição do tamanho, com pouca ênfase à dinâmica dos agregados a partir de determinadas características e observadas as relações temporais, especialmente como no caso de agregados resultantes na fragmentação de solo compactado.

Apesar de há muito reconhecido e consideravelmente investigado, o processo de compactação do solo agrícola não é suficientemente entendido para que se possa predizê-lo quantitativamente. Simplificadamente, na compactação do solo as partículas sólidas são aproximadas por forças compressoras, deslocando ar e água existentes entre elas. No entanto, o processo dá-se em complexas interações de causas e fatores, que podem apresentar intensidades variáveis de expressão. Os esforços em modelar o processo de compactação não têm conseguido assegurar suficiente

precisão ou abrangência de condições às equações obtidas. O que e como ocorre entre pequenas porções de solo compactado e fragmentado parece ser ainda menos estudado do que o processo de compactação.

Alguns comportamentos do solo sujeito a tensões, no entanto, já são bem mais conhecidos. Sabe-se, por exemplo, que a compactação pode ocorrer principalmente durante a primeira compressão do solo, ainda que outras subseqüentes se dêem por tensões de maior intensidade (TAYLOR e GILL, 1984; CULLEY e LARSON, 1987), significando que a compressibilidade do solo agrícola pode ser praticamente esgotada durante uma primeira compressão. Isso reforça a preocupação sobre o fato de que à medida que uma condição porosa mais adequada possa estar sendo promovida por um manejo de solo que estimule a atividade biológica, a compressibilidade do sistema pode aumentar e a compactação relativa de uma determinada tensão de compressão será maior. Contudo, em condições de umidade ótima para a compactação, a densidade do solo pode aumentar significativamente pela repetição da aplicação de energia compressiva (RAGHAVAN et al., 1976). Logo, um solo já adensado não nos isentaria dos cuidados em evitar tensões desnecessárias, especialmente se superiores à maior tensão já sofrida anteriormente em condições de umidade semelhante.

Sabe-se também que, para uma dada tensão de compressão sobre o solo, o aumento da superfície proporciona uma maior expansão da compactação na direção e sentido da

força, dificultando ainda mais a recuperação da estrutura do solo, face à menor atividade biológica em maior profundidade.

Comportamentos como os acima referidos limitam a eficácia do controle da compactação através da redução das operações de preparo e manejo ou redução da tensão de compressão pelo aumento das dimensões das superfícies de contato entre o pneu e o solo. Algum grau de compactação pode ser, assim, considerado intrínseco ao processo da agricultura mecanizada.

#### 2.2.1. Características edáficas de agregados densos

Condições de solo com porções compactadas têm sido referidas como prejudiciais, não prejudiciais ou mesmo benéficas ao desenvolvimento de plantas, ainda que a frequência de relatos escasseie muito nessa mesma ordem.

O maior ou menor desenvolvimento da planta depende das quantidades, proporções e tipos de interações que as raízes mantêm com o meio. A redução do diâmetro dos poros pela compactação pode representar dificuldades ao crescimento radicular (CINTRA, 1980). Contudo, qualitativamente, as propriedades do sistema trifásico persistem (!) mesmo em solo compactado. A simples aproximação das partículas sólidas poderia não constituir impedimento mecânico ao crescimento de uma raiz idealmente fina. No entanto, os efeitos da compactação restringem não apenas o crescimento



de raízes normais, mas também afetariam o crescimento da hipotética raiz mais fina. Essa restrição ao crescimento decorreria de outros fatores que não a resistência mecânica pela presença física das partículas mais próximas entre si. Esses fatores estariam relacionados à desproporção de superfícies de interfaces ou volumes de interfases raiz-solução, raiz-ar, raiz-sólidos e água-ar, que só em certos arranjos estruturais ocorrem adequadamente.

MISRA et al. (1988), em tentativa de predição de absorção de fósforo, estudaram o crescimento radicular em função de tamanho e resistência de agregados. Uma pressuposição dos autores foi que a raiz, crescendo sobre agregados de baixa resistência e através deles, explora maior volume de solo de que crescendo apenas sobre a superfície de agregados de maior tamanho ou maior resistência. Observaram, no entanto, que o fósforo absorvido por metro de raiz foi superior em condições de agregados maiores e de maior resistência, ao observado nos agregados de menor resistência, em que as raízes cresciam inclusive através dos mesmos. Como esperavam os autores, nos agregados maiores e de maior resistência efetivamente houve menor crescimento de raízes no seu interior; mas houve também um maior crescimento de pelos radiculares sobre a sua superfície. Para explicar essa maior absorção de fósforo, os citados autores lembram o menor crescimento radicular em agregados maiores e mais resistentes, associando-o a uma possível capacidade da planta em aumentar o crescimento e a absorção

em outras raízes, situadas em regiões "favoráveis", que compensariam as restrições ao crescimento e absorção às raízes sobre agregados mais resistentes.

Contudo, os autores não consideraram a possibilidade de que a maior absorção de fósforo por metro de raiz nos agregados de maior resistência possa ter sido decorrência indireta de estímulos ao crescimento de pelos radiculares e de favoráveis condições de suprimento e absorção ocorrentes entre agregados e pelos. Interpretando resultados desses últimos autores, o que nos parece ocorrer é que, à medida em que os agregados crescem de tamanho, e portanto o contato raiz-solo então diminuiria, a eficácia unitária dessas interfaces seria maior, pois para agregados com tamanho crescente, os rendimentos de matéria seca e de concentração de fósforo no tecido aéreo decrescem em taxa inferior àquela de redução do crescimento radicular. Poder-se-ia esperar, então, que a redução do volume de solo explorado pela maior resistência à penetração radicular em agregados densos possa, dentro de determinadas condições e de alguma forma, ser compensada pelo produto da quantidade e qualidade das camadas superficiais exploradas nesses agregados.

Tão ou mais importante que uma grande superfície interfacial, parece ser a condição em que ocorre a interface raiz-solo. A proliferação de pelos radiculares na superfície de agregados com características mecânicas desfavoráveis à penetração radicular, como observado por

MISRA et al. (1988), ou a elevada difusão iônica no solo em condições de densidade elevada (PHILLIPS e BROWN, 1966) podem ser causas de compensações no desenvolvimento de plantas em condições de agregados com maior resistência e que restringem o crescimento radicular. BHAT e NYE (1973) demonstraram que a maior parte do fósforo absorvido pelas raízes vem do solo explorado pelos pelos radiculares. E, individualmente, um agregado de elevada densidade pode apresentar, pelo menos em sua região periférica sujeita a tracas de gases mais intensas, um meio onde as relações volumétricas entre as fases do solo são adequadas às necessidades dos pelos radiculares.

#### 2.2.2. Características mecânicas de agregados densos

Sob tensão de compressão, os agregados são comprimidos e as partículas que os constituem são parcialmente reorientadas, de forma a diminuir o espaço poroso, e estabelecendo maior superfície de contato e apoio entre si. Dependendo da intensidade da compressão, o sistema resulta mais ou menos maciço, com efeitos tanto expressos no rompimento, rearranjo e fusão de agregados, bem como no rearranjo das partículas intra-agregado (orientação de partículas).

Quando uma porção de solo compactado é fragmentada, resultam agregados densos, com distribuição de tamanho que

também depende dos processos de fragmentação. Isoladamente, esses agregados densos continuam a representar concentrações de partículas orientadas. Essa condição de partículas orientadas implica um acréscimo de potencial termodinâmico e, portanto, uma maior propensão a trabalhos espontâneos. Essa maior propensão pode assumir importantes significados, com base no que se pressupõe mais abaixo, quando relações temporais são consideradas no comportamento dos agregado individualmente e do sistema que compõem. Por um lado, uma condição mais densa do agregado implica uma menor compressibilidade em relação ao agregado não compactado (UTOMO e DEXTER, 1981a), uma vez que a aproximação e orientação das partículas aumenta os pontos de apoio e atrito entre as mesmas. Por outro lado, a maior aproximação e orientação das partículas aumenta a instabilidade termodinâmica do agregado, aumentando a intensidade de atividade superficial intra e entreagregados, para idênticas condições de temperatura e pressão.

Portanto, em hipótese, sistemas compostos de agregados resultantes da fragmentação de solo com diferentes níveis de compactação e de orientação de partículas, devem apresentar diferenciadas taxas de reconsolidação e, consequentemente, diferenciadas relações tempo-tensões-resistência coesiva, desde que as seguintes pressuposições possam ser aceitas:

- partículas orientadas no processo de compactação do solo tendem a reorientar-se até atingirem uma condição

de mínima energia livre;

- a fragmentação de um solo compactado acelera o processo de reorientação de partículas;
- a reorientação de partículas primárias na interfase agregado-solução-agregado é um importante mecanismo de reconsolidação de pontes agregado-agregado;
- o rearranjo das partículas intra-agregados para posições de menor energia livre é um processo termodinamicamente altamente provável, mas de cinética muito baixa, implicando uma longa vida média dos agregados adensados;
- a taxa de rearranjo das partículas nas interfaces agregado-agregado é maior em agregados com maior orientação de partículas.

Unidades de elevada resistência individual (agregados mais densos), fortemente ligadas entre si em função do comportamento pressuposto (alta cimentação das pontes agregado-agregado pela intensificação do rearranjo de partículas), resultariam em condição estrutural com características desejáveis: maior resistência à compressão e boa distribuição de diâmetro de poros, justificando a ampliação de conceitos de boas características físicas de agregados de solo, quando se considera todas as implicações da mecanização.

### 3. DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

#### 3.1. Coesividade do solo

*Propõe-se que a coesividade de um solo deva ser entendida, neste trabalho, como a resistência que o sistema de agregados oferece a uma força tratora dispendida no rompimento das ligações agregado-agregado.*

Considere-se uma amostra de solo submetida a uma tensão de tração  $T$  crescente até levá-la à fratura (Figura 1 a). A tensão de tração máxima aplicável  $T_{\text{máx}}$  e a respectiva resistência do solo por coesividade podem ser dadas por  $T_{\text{máx}} = \text{Ace} \cdot S$ , em que:

$\text{Ace} \cdot S$  = produto coesivo ou coesividade do solo;

$\text{Ace}$  = área de contato efetivo, ou seja, é a fração da área do contato aparente  $A_c$ , em que a distância interfacial de partículas é suficientemente pequena para permitir expressivos efeitos tratores por forças derivadas de superfície (Figura 1 b, c);

$S$  = tração média em  $\text{Ace}$ , resultante de forças derivadas de superfície;

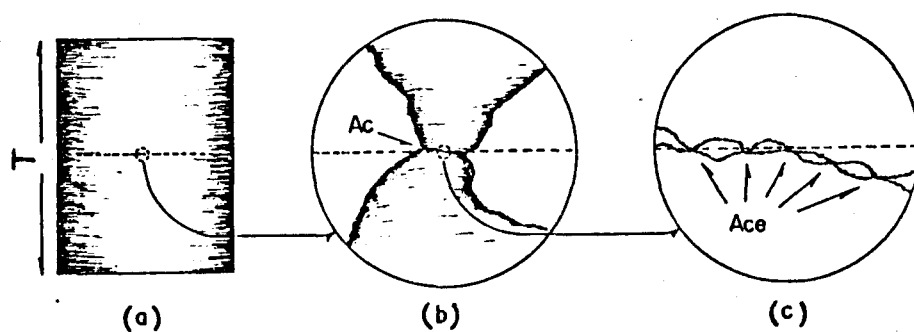


FIGURA 1 - (a) amostra de solo sob tração  $T$ ; (b) área de contato aparente  $A_c$ ; (c) área de contato efetivo  $A_{ce}$ .

### 3.2. Relações tensão-deformação-resistência do solo como um sistema macroparticulado

*Propõe-se um modelo simplificado de decomposição de tensões de compressão aplicáveis ao solo agrícola, numa tentativa de identificar relações de transformação entre essas tensões e a coesividade do sistema. São considerados, em especial, níveis de compactação e unidade em que ocorre a compactação do solo, que, fragmentado, origina agregados com presumíveis diferenças no grau de orientação de suas partículas.*

Considere-se que  $\sigma$  seja uma tensão de compressão crescente até levar a amostra de solo não confinado à fratura (Figura 2 a). Transmitida através de contatos entre os agregados,  $\sigma$  atua sobre o plano G, com intensidade  $\sigma \cdot \cos\alpha = R(\sigma)$  (Figura 2 b). O grande deslocamento lateral entre os agregados no momento da fratura decorreria da superação de relações coesivas C. Para tanto, seria necessário derivar de  $\sigma$  uma tensão horizontal  $R(\sigma) \cdot \cos\beta = L(\sigma)$  suficiente para superar  $C \cdot \cos\epsilon = C'$ , que se opõem a  $L(\sigma)$ .

Até o momento da fratura do solo,  $L(\sigma)$  tem o mesmo módulo que  $C'$ , ou seja, a fratura só ocorre quando na superfície unitária de contato efetivo  $L(\sigma) + dL(\sigma) > C'$ , quantitativamente traduzindo uma superação de resistência a uma tensão de tração. A resistência a essa tensão de



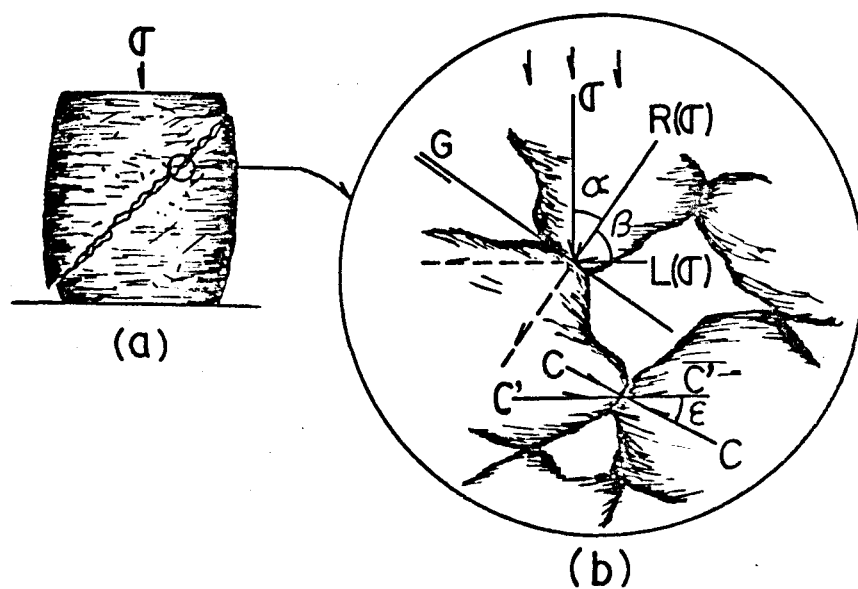


FIGURA 2 - (a) amostra de solo em fratura por compressão;  
(b) transmissão e decomposição da tensão  $\sigma$ .

tração, representada por relações coesivas  $C'$ , pode ser expressa em termos de produto coesivo  $Ace.S$  proposto no item 3.1.

Então, para uma tensão de compressão  $\sigma$ , o solo a ela resistirá em até  $L(\sigma) = R(\sigma) \cdot \cos\beta = \sigma \cdot \cos\alpha \cdot \cos\beta$ , decorrendo que a resistência máxima será  $L(\sigma) \leq \sigma/2$ . O valor máximo de  $L(\sigma)$  será igual a  $\sigma/2$ , quando  $\alpha = \beta = 45^\circ$ , condição em que a razão  $\sigma_{fratura}/C$  será mínima, equivalendo, por conseguinte, à resistência coesiva crítica do solo.

Quando  $\sigma$  for suficiente para expressar uma tensão  $L(\sigma) + dL(\sigma) > C'_{local}$ , há o desencadeamento do processo de fratura. Com o rompimento das ligações que determinam  $C'$  de um "local",  $R(\sigma)$  não mais se decompõe parcialmente em  $L(\sigma)$  e, por conseguinte, tende a acelerar o processo e definir um plano de fratura, como é sugerido na Figura 2 a.

No entanto, considerar-se  $L(\sigma) = \sigma/2 = Ace.S$  pode representar uma superestimativa dessa última. Ocorre que sendo o solo um sistema macroparticulado compressível, durante a aplicação de uma tensão de compressão  $\sigma$ , parte da energia é absorvida na realização de trabalho plástico, com incrementos dos fatores do produto  $Ace.S$ , como é sugerido na Figura 3. Esses incrementos de  $Ace$  e de  $S$  demandarão tensões adicionais para produzir fratura da amostra.

$$\text{Então, } L(\sigma) = \sigma/2 = [Aceo.So] + \Delta[Ace.S](\sigma)$$

em que:

$Aceo.So$  = produto coesivo ou coesividade original

$\Delta[Ace.S](\sigma)$  = incremento coesivo por efeitos de  $\sigma$ .



Uma relação temporal para  $\Delta[Ace.S](\sigma)$  pode ser obtida das situações que seguem:

1. amostra levada à fratura por tensão de tração aplicada imediatamente após a fragmentação do solo e subsequente condicionamento por tensões geostáticas ou artificialmente provocadas, permitindo obter-se a coesividade original no tempo  $t=0$  após o condicionamento:

$$R_{m\acute{a}x} = [Ace_0 \cdot S_0]_{t=0}$$

2. amostra levada à fratura por tensão de tração aplicada em um tempo  $t>0$  após a fragmentação e condicionamento, permitindo obter-se a coesividade em um tempo  $t>0$ :

$$R_{m\acute{a}x} = [Ace_0 \cdot S_0]_{t=0} + \Delta[Ace_0 \cdot S_0](t) = [Ace_0 \cdot S_0]_{t>0}$$

3. amostra levada à fratura por tensão de compressão aplicada imediatamente após a fragmentação e condicionamento, permitindo obter-se  $\Delta[Ace.S](\sigma)$  no tempo  $t=0$  e relações quantitativas entre esse produto e a tensão  $\sigma$  que o produz:

$$R_{m\acute{a}x} = [Ace_0 \cdot S_0]_{t=0} + \Delta[Ace.S](\sigma)_{t=0} = \frac{\sigma}{2}$$

4. amostra levada a fratura por tensão de compressão aplicada em um tempo  $t>0$  após a fragmentação e condicionamento, permitindo obter-se  $\Delta[Ace.S](\sigma)$  em um tempo  $t>0$

e relações quantitativas entre esse produto e a tensão  $\sigma$  que o produz:

$$R_{max} = [Ace_0 \cdot S_0]_{t=0} + \Delta [Ace.S](\sigma)_{t=0} = \frac{\sigma}{2}$$

Em termos infinitesimais, dividindo-se  $\Delta [Ace.S](\sigma)$  por  $\sigma$  obtém-se a relação  $d[Ace.S](\sigma)/d\sigma$  ao tempo em que a fratura ocorre. Uma expressão temporal dessa relação pode ser obtida dividindo-se  $\{d[Ace.S](\sigma)/d\sigma\}_{t=0}$  por  $\{d[Ace.S](\sigma)/d\sigma\}_{t>0}$ , obtendo-se a taxa de variação

$$\frac{\delta \frac{[d(Ace.S)(\sigma)/d\sigma]_{t=0}}{[d(Ace.S)(\sigma)/d\sigma]_{t>0}}}{\delta t}$$

Essa taxa de variação deve ser positiva e decrescente até um mínimo de zero (Figura 4). Note que ao aplicar-se uma tensão de copressão  $\sigma$  em um tempo  $t=0$  após o condicionamento, o somatório dos produtos coesivos  $\{Ace_0 \cdot S_0 + \Delta [Ace.S](\sigma)\}_{t=0}$  decorre de uma condição de solo em que ainda não há expressão de  $[Ace_0 \cdot S_0](t)$ , implicando que a parcela  $[Ace_0 \cdot S_0]$  é relativamente baixa. Com isso,  $\Delta [Ace.S](\sigma)$  tem maior expressão relativa na definição da tensão de copressão  $\sigma$  capaz de levar o solo à fratura naquele tempo. Disso também decorre que  $\{d[Ace.S](\sigma)/d\sigma\}_{t=0}$  será relativamente alto. Já quando a fratura ocorre em um tempo  $t>0$ , um produto coesivo  $[Ace_0 \cdot S_0](t)$  estará agregado à parcela  $[Ace_0 \cdot S_0]$ . Além de

significar aumento de resistência coesiva do solo,  $[Aceo.So](t)$  significa que o solo já se encontra em estado de maior estabilidade termodinâmica. Enquanto a maior resistência do solo demandará maior tensão de compressão  $\sigma$  aplicável para ocasionar a fratura, a condição de maior estabilidade torna o sistema menos propenso a suportar deformações sem que haja fratura de ligações já estabelecidas. Ou seja, além de uma maior tensão  $\sigma$  decorrente de um elevado  $Aceo.So$  em um tempo  $t > 0$ , maiores  $\Delta[Ace.S](\sigma)$  incorreriam em deformações que levariam a rupturas de ligações agregado-agregado já estabelecidas no tempo, com conseqüentes perdas de resistência já adquirida, expressa por  $[Aceo.So](t)$ . Assim, a relação  $\{d[AceS](\sigma)/d\sigma\}_{t>0}$  tende a ser baixa e, por decorrência, a relação  $\{d[Ace.S](\sigma)/d\sigma\}_{t=0}/\{d[Ace.S](\sigma)/d\sigma\}_{t>0}$  tende a crescer.

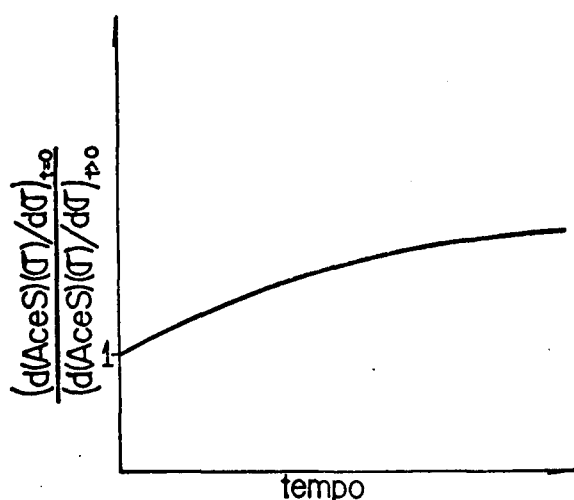


FIGURA 4 - Relação temporal de produto coesivo derivado de tensões de compressão  $\sigma$  entre agregados

Dado pressupor-se que agregados mais densos apresentam maior potencial termodinâmico e maior cinética de reorientação de partículas em sua região periférica, é válido também pressupor-se que o produto coesivo  $[Aceo.So](t)$  seja potencialmente maior para agregados mais densos. Logo, o decréscimo de  $\{d[Ace.S](\sigma)/d\sigma\}_{t \rightarrow 0}$  seria mais acentuado para agregados mais densos, aumentando a taxa de crescimento da relação temporal (Figura 5).

O pressuposto segundo o qual há maior potencial termodinâmico e maior cinética de rearranjo de partículas em região periférica de agregados mais densos decorre do maior grau de orientação de partículas nessa região. O grau

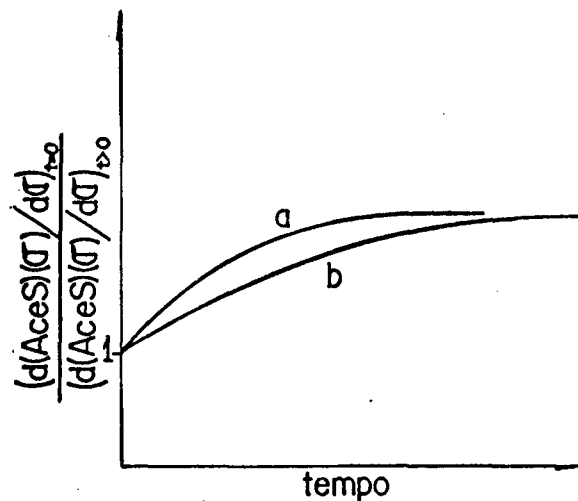


FIGURA 5 - Relação temporal de produto coesivo derivado de tensões de compressão  $\sigma$  em agregados mais densos (a) e menos densos (b).

de orientação de partículas não é função apenas da densidade ou do nível de energia de compactação, mas também do teor de umidade em que o solo foi compactado (LAMBE, 1951). Em uma mesma densidade, as partículas resultam mais orientadas quando o solo é compactado em condições de umidade acima da ótima do que se compactado com umidade abaixo da ótima. Então, temos que a razão entre  $\{d[AceS](\sigma)/d\sigma\}_{t=0}$  e  $\{d[AceS](\sigma)/d\sigma\}_{t>0}$  cresceria mais acentuadamente em agregados oriundos de solo previamente compactado em condições de umidade acima da ótima (Figura 6).

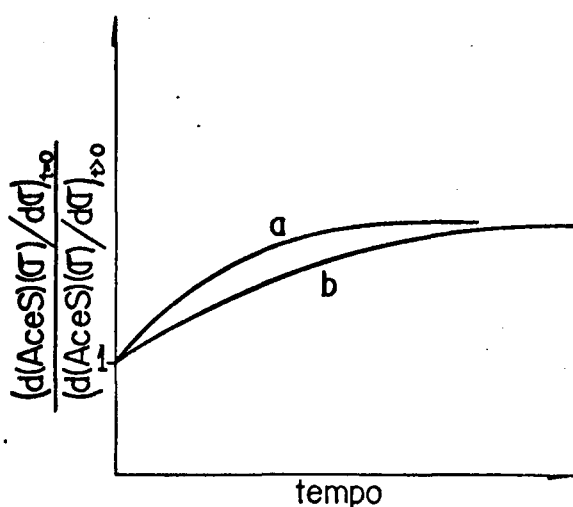


FIGURA 6 - Relação temporal de produto coesivo derivado de tensões de compressão  $\sigma$  em agregados de mesma densidade, mas oriundos da fragmentação de solo compactado em condições de umidade acima (a) e abaixo (b) da ótima.



### 3.3. Fatores e mecanismos de recomposição da coesividade entre agregados do solo

*Partindo-se de que  $T_{max}=Ace.S$  traduz a coesividade de uma porção de solo, propõe-se o desenvolvimento dessa expressão, numa tentativa de identificar o mecanismo de ocorrência predominante entre aqueles propostos como promotores do produto coesivo  $Ace.S$ . São considerados, em especial, a dureza e o grau de orientação das partículas do agregado.*

Em condições em que pode ocorrer fluxo plástico, a área de contato aparente entre agregados  $Ac$  é proporcional à razão entre a tensão compressiva no contato, que deriva de tensão compressiva  $N$  de carregamento, e a resistência à deformação por compressão ou dureza  $q$  do agregado

$$Ac \propto \frac{N}{q}$$

Característica de cada material, a dureza  $q$  é muito maior nas partículas constituintes do agregado do que no próprio como um todo. Assim, o crescimento de área de contato efetivo  $Ace$  pelo aumento de tensões de carregamento  $N$  resultaria principalmente do maior número de contatos efetivos com o aumento da área de contato aparente  $Ac$  e não pelo aumento individual da superfície de cada contato efetivo. Em geral, a dureza  $q$  do agregado tende a aumentar

com o grau de adensamento. Para a mesma densidade do solo úmido, a dureza deve aumentar quanto menor for o grau de orientação das partículas, em face do maior equilíbrio entre campos elétricos das mesmas.

Admite-se que no produto coesivo  $Ace.S$  proposto nos itens 3.1 e 3.2, a tração  $S$ , decorrente de interações partícula-interfase-partícula, cresce com a aproximação das superfícies. Logo, quanto maior for a tensão compressiva no contato, maior seria  $S$  resultante. Como para dada tensão de carregamento  $N$  a área de contato agregado-agregado diminui com o aumento da dureza  $q$ , temos que entre agregados mais duros a tensão compressiva no contato será maior e, em decorrência, a tração  $S$  média na área de contato efetivo também será maior, ou seja,  $S \propto (N, q)$ . Tem-se, então, que imediatamente após a fragmentação e subsequente aplicação de tensão de carregamento  $N$ , a tensão de tração necessária para levar a amostra à fratura pode ser dada por

$$T_{max} = T_i = Ace_1(N, \frac{1}{q}) S_1(N, q)$$

em que  $T_{max} = T_i$  é a tração máxima aplicável até ocorrer a fratura,  $Ace_1(N, 1/q)$  é a área de contato efetivo inicial e  $S_1(N, q)$  é a tração média inicial nos contatos efetivos.

Admite-se, também, que a área de contato efetivo  $Ace$  aumenta com o tempo, mesmo o solo não estando sob tensão de carregamento. Um dos mecanismos seria a acomodação de partículas dos diversos tamanhos, que tendem a voltar a ocupar posições de menor energia livre. Aumentos de

contatos num sistema particulado normalmente implicam redução de espaço vazio, ou seja, há aumento da densidade global  $D_g$ . Portanto, a acomodação de agregados ou macropartículas por ação de forças derivadas de massa, em função do tempo após a fragmentação do solo, deverá ser menor em condições de densidade global já mais elevada. Como  $D_g$  de um solo fragmentado tende a aumentar com o aumento de tensões de carregamento  $N$ , a expansão da área de contato efetivo por acomodação de macropartículas ou agregados com o tempo ( $Ace_1$ ), seria inversamente afetada por  $N$ , ou

$$\left(\frac{dAce}{dt}\right)_{\text{macrorearranjo}} = Ace_1\left(t, \frac{1}{N}\right)$$

Pelo rearranjo de partículas menores, também poderiam estabelecer-se novos contatos, conforme é sugerido na Figura 7. Quando dois agregados estão suficientemente próximos, partículas da superfície dos agregados em processo de reorientação podem passar a interagir com ambas as superfícies. Essas partículas têm, então, sua energia livre diminuída, criando gradiente energético na interfase em acomodação, induzindo fluxos de difusão e de massa para essas regiões. O grau de proximidade e a extensão de regiões suficientemente próximas para que ocorram os mecanismos propostos crescem, respectivamente, com a tensão de carregamento  $N$  e a conseqüente deformação e expansão da área de contato  $Ac$  entre agregados. Como se viu anteriormente, a tensão e a deformação no contato são funções de tensões de

carregamento  $N$  e da dureza  $q$ . Note-se que uma dureza  $q$  elevada pode afetar o produto coesivo  $Ace.S$  de forma diversa, em função do valor de  $N$ . Uma tensão  $N$  muito baixa pode não ser suficiente para promover deformação do agregado de elevada dureza e, por consequência, ocorrerá uma reduzida extensão de regiões adequadamente próximas. Já para uma elevada dureza em presença de uma tensão de carregamento  $N$  suficientemente elevada para provocar deformação notável, ocorrerá uma combinação de maior área de contato efetivo  $Ace$  e elevada tração interfacial  $S$ , além de aumentar o grau de orientação de partículas nessa área de contato efetivo.

Com o aumento do número de contatos, mesmo que o teor de umidade não mude, a energia de retenção de água normalmente tende a aumentar, arrastando colóides, materiais em suspensão e solutos. O acúmulo dessas substâncias na região de contato, seja por difusão ou fluxo de massa, aumenta a extensão da área de contato efetivo  $Ace$ .

Dado pressupor-se que partículas coloidais, situadas superficialmente em agregados em que se encontrem mais



FIGURA 7. Estabelecimento de contato efetivo por microrrearranjo

orientadas, sejam mais suscetíveis a reposicionamentos por forças derivadas de superfície do que o são as partículas do mesmo tamanho, situadas na superfície de agregados em que se encontrem menos orientadas, tem-se que a expansão da área de contato efetivo pelo rearranjo de micropartículas com o tempo ( $Ace_2$ ) é um processo positivamente afetado pela densidade dos agregados ( $D_a$ ), desde que  $D_a$  possa traduzir grau de orientação de partículas mais do que a própria relação massa/volume. Então,

$$\left(\frac{dAce}{dt}\right)_{\text{microrearranjo}} = Ace_2(t, N, q, D_a)$$

Admitindo-se que  $D_a$  afete o aparecimento de contatos entre partículas com o tempo, e que o aumento do número de contatos tenda a aproximar as mesmas pelo aumento da pressão negativa sobre a água,  $D_a$  indiretamente afeta a intensidade de variação da tração  $S$  com o tempo ( $S_1$ ) na unidade de  $Ace$ , ou

$$\left(\frac{dS}{dt}\right) = S_1(t, D_a)$$

Então, se  $T_{\max}$  é dada por  $Ace \cdot S$ , com o tempo somam-se a  $T_1 = Ace_1(N, 1/q) \cdot S_1(N, q)$ , os produtos  $T_1 = Ace_1(t, 1/N) \cdot S_1(t, D_a)$ ,  $T_2 = Ace_2(t, N, q, D_a) \cdot S_1(t, D_a)$ , além de um produto  $T_3 = Ace_1(N, 1/q) \cdot S_1(t, D_a)$ , já que  $S_1(N, q)$  também sofrerá efeito  $S_1(t, D_a)$ . Assim,  $T_{\max} = T_1 + T_1 + T_2 + T_3$  ou

$$T_{\max} = Ace_1\left(N, \frac{1}{q}\right) \cdot S_1(N, q) + \left[Ace_1\left(N, \frac{1}{q}\right) + Ace_1\left(t, \frac{1}{N}\right) + Ace_2\left(t, N, q, D_a\right) S_1(t, D_a)\right]$$

em que os produtos  $T_1$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  e  $T_3$  representam os diferentes mecanismos de recomposição da coesividade entre agregados após a fragmentação do solo.

### 3.3.1. Detecção de mecanismos predominantes

A qualquer tempo  $t$  após a fragmentação do solo e seu acondicionamento sob determinada tensão de carregamento  $N$ , a função  $T_{\max}$  poderá ter comportamento genérico quantitativamente distinguível em função das características dos agregados e da relativa intensidade de expressão de cada um dos mecanismos de expressão de coesividade em termos de produto Ace.S. A seguir são apresentadas situações hipotéticas de predominância de cada um dos mecanismos, com base nas relações de dependência que os mesmos mantêm com a tensão de carregamento  $N$ , a dureza  $q$  e o grau de orientação de partículas  $D_n$  dos agregados.

Como a conclusão de que haja predominância de um determinado mecanismo decorrerá da convergência de evidências, o comportamento de resultados experimentais pode ser comparado ao comportamento genérico e pressuposto, em termos de  $T_{\max}$  absoluta, incremento de  $T_{\max}$  com o tempo e em termos da razão  $T_{\max, t > 0} / T_{\max, 1}$  em que  $i = t \approx 0$ .

a)  $T_{\text{máx}}$  imediatamente após a fragmentação e subsequente tensão de carregamento N

$$T_{\text{máx}_i} - Ace_i \left( \frac{N}{q} \right) \cdot S_i(N, q)$$

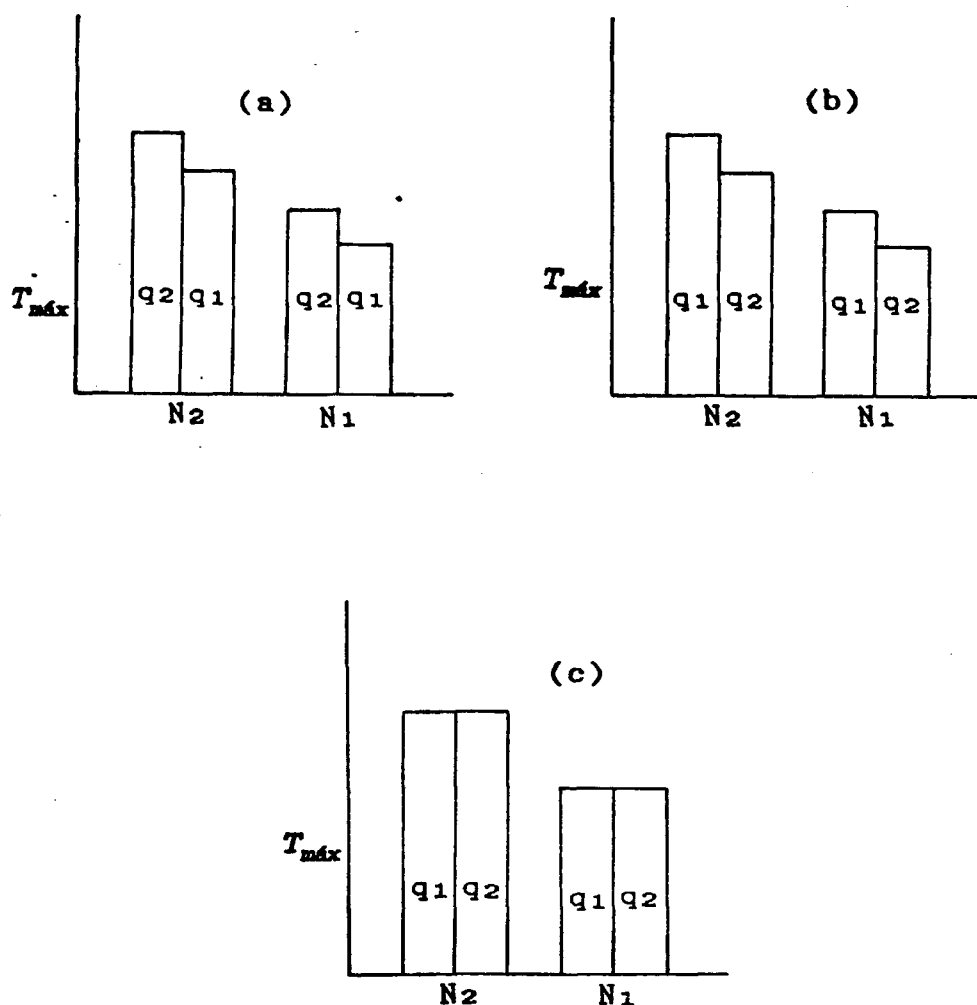


FIGURA 8 - Tração máxima aplicável na fratura de uma amostra de agregados de solo imediatamente após seu condicionamento sob tensão N.  
a) quando o incremento em  $S_i$  por elevação de tensão devida a uma  $q$  elevada for mais determinante do que a redução de  $Ace_i$  devido a mesma  $q$  elevada; b) caso recíproco de a; c) quando houver compensação entre os efeitos acima.

- b) Incremento de  $T_{\max}$  por efeito de intensificação de tração  $S$  em área de contato efetivo estabelecida quando do carregamento do solo com tensão  $N$ .

$$\frac{\Delta T_{\max}}{\Delta t} = Ace_1 \left( N, \frac{1}{q} \right) \cdot S_1(t, D_s)$$

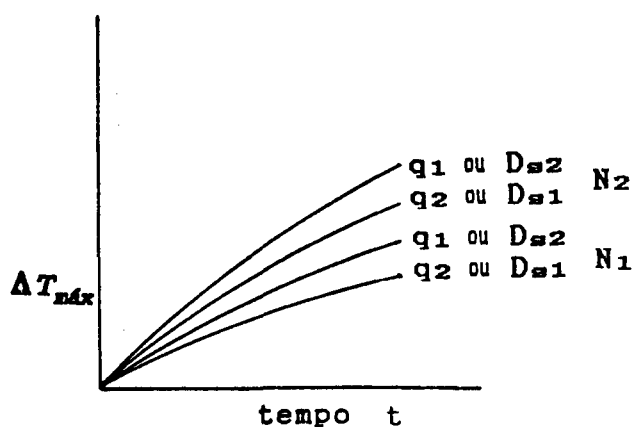


FIGURA 9 - Incremento de tração máxima aplicável na fratura de uma amostra de solo com o tempo, predominantemente em função da intensificação de tensões de tração em área de contato efetivo estabelecido no condicionamento. Considerar  $q$  quando a reduzida  $Ace_1$  decorrente de uma elevada dureza fosse mais determinante que os efeitos de uma elevada  $D_s$  em elevar  $S$  naquela  $Ace_1$  e;  $D_s$  quando a intensificação das tensões de tração  $S$  por reorientação de partículas sem aumento de  $Ace$  superasse os efeitos de elevada  $q$ .



c) Incremento de  $T_{\max}$  por efeito de incrementos de área de contato efetivo  $Ace$  por macrorrearranjo

$$\frac{\Delta T_{\max}}{\Delta t} = Ace_1(t, \frac{1}{N}) \cdot S_1(t, D_s)$$

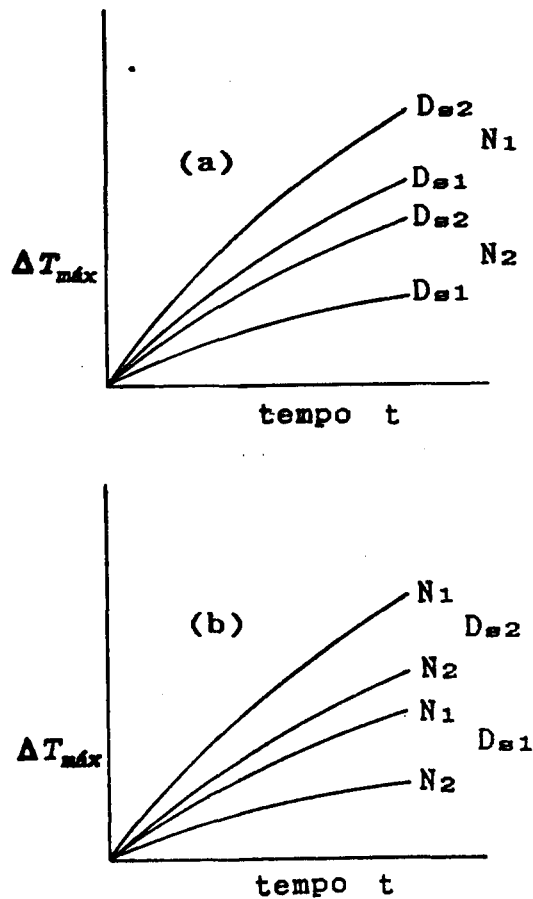


FIGURA 10 - Incremento de tração máxima aplicável na fratura de uma amostra de solo com o tempo, predominantemente em função do incremento da área de contato efetivo por rearranjo de agregados. a) quando  $N$  mais elevada limita  $Ace_1$  de forma a ser mais determinante do que uma alta  $D_s$  em elevar  $S_1$ ; b) caso recíproco de (a).

d) Incremento de  $T_{\max}$  por efeito de incrementos de área de contato efetivo  $Ace$  por microrrearranjo

$$\frac{\Delta T_{\max}}{\Delta t} = Ace_2(t, N, q, D_s) \cdot S_1(t, D_s)$$

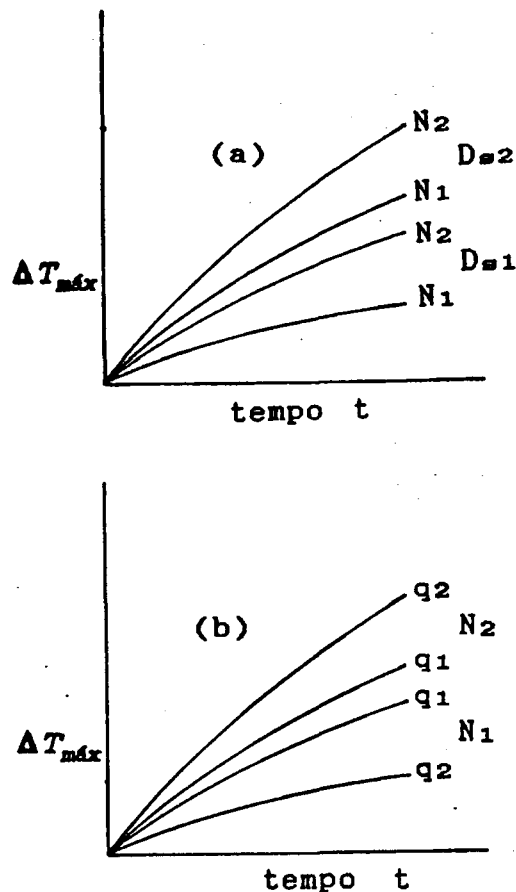


FIGURA 11 - Incremento de tração máxima aplicável na fratura de uma amostra de solo com o tempo, predominantemente em função do incremento de área de contato efetivo por microrrearranjo de partículas. a) quando mais do que pela sua dureza, os agregados diferenciam-se pelo grau de orientação de partículas; b)  $q$  torna-se importante em seus efeitos sobre  $Ace$  se  $N$  for suficientemente alta para provocar deformação considerável.

e) Relação entre  $T_{\max}$  em um tempo  $t$  e  $T_{\max}$  inicial por efeito de intensificação da tração  $S$  em área de contato efetivo  $Ace$  estabelecida quando do carregamento do solo com tensão  $N$ .

$$\frac{T_{\max t}}{T_{\max i}} = \frac{Ace_i(N, \frac{1}{q}) \cdot S_i(N, q) + Ace_i(N, \frac{1}{q}) \cdot S_i(t, D_s)}{Ace_i(N, \frac{1}{q}) \cdot S_i(N, q)}$$

ou

$$\frac{T_{\max t}}{T_{\max i}} = 1 + S(t, \frac{1}{N}, D_s, \frac{1}{q})$$

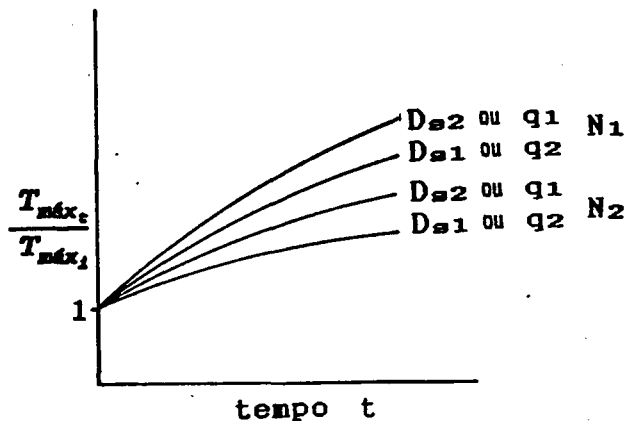


FIGURA 12 - Relação entre trações máximas aplicáveis na fratura de uma amostra de solo em tempos  $t > 0$  e  $t = 0$ , com predominância de fortalecimento das forças de ligação em área de contato efetivo estabelecida no condicionamento sob tensão de carregamento  $N$ .

f) Relação entre  $T_{\max}$  em um tempo  $t$  e  $T_{\max}$  inicial por efeito de incrementos de área de contato efetivo  $Ace$  por macrorrearranjo.

$$\frac{T_{\max_t}}{T_{\max_i}} = \frac{Ace_i(N, \frac{1}{q}) \cdot S_i(N, q) + Ace_i(t, \frac{1}{N}) \cdot S_i(t, D_s)}{Ace_i(N, \frac{1}{q}) \cdot S_i(N, q)}$$

ou

$$\frac{T_{\max_t}}{T_{\max_i}} = 1 + Ace(t, q, \frac{1}{N^2}) \cdot S(t, \frac{1}{N}, D_s, \frac{1}{q})$$

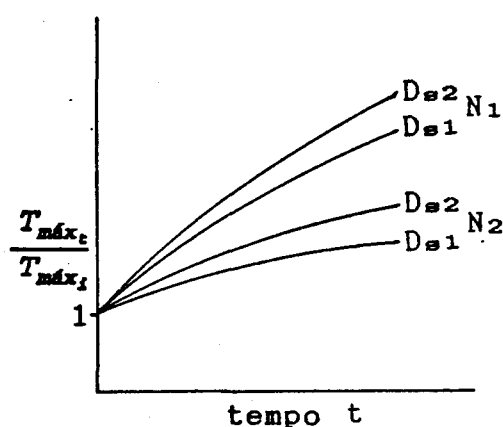


FIGURA 13 - Relação entre trações máximas aplicáveis na fratura de uma amostra de solo em tempos  $t > 0$  e  $t = 0$ , com predominância de incrementos de área de contato efetivo  $Ace$  por rearranjo de agregados.

g) Relação entre  $T_{\max}$  em um tempo  $t$  e  $T_{\max}$  inicial por efeito de incrementos de área de contato efetivo  $Ace$  por microrrearranjo

$$\frac{T_{\max t}}{T_{\max i}} = \frac{Ace_1(N, \frac{1}{q}) \cdot S_1(N, q) + Ace_2(t, N, q, D_s) \cdot S_1(t, D_s)}{Ace_1(N, \frac{1}{q}) \cdot S_1(N, q)}$$

ou

$$\frac{T_{\max t}}{T_{\max i}} = 1 + Ace(t, D_s^2, q) \cdot S(t, \frac{1}{N}, D_s, q)$$

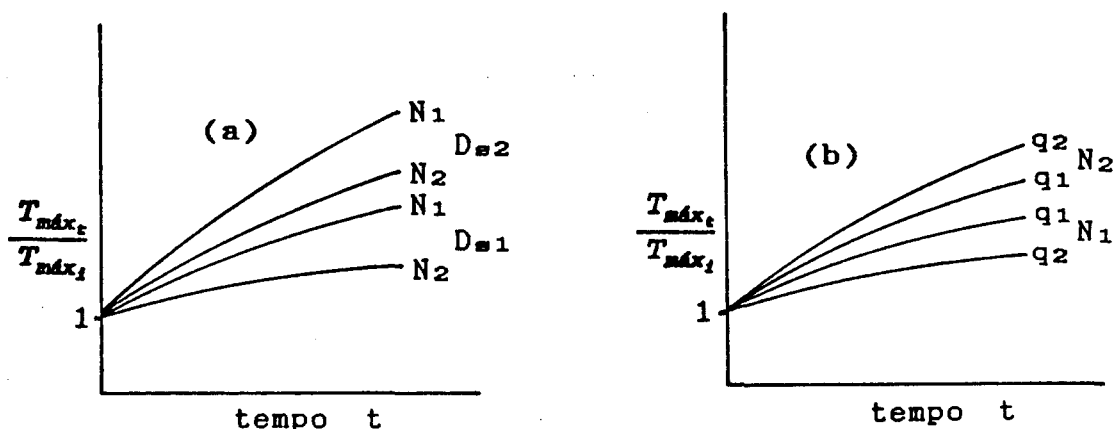


FIGURA 14 - Relação entre trações máximas aplicáveis na fratura de uma amostra de solo em tempos  $t > 0$  e  $t = 0$ , com predominância de incremento de  $Ace$  por microrrearranjo de partículas; a) quando os efeitos sobre o produto  $Ace \cdot S$  decorrem principalmente das diferenças de grau de orientação de partículas nos agregados; b) quando são as diferenças de dureza  $q$  que mais determinam o incremento do produto  $Ace \cdot S$

#### 4. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

*A etapa experimental é a operacionalização das situações testáveis propostas no item 3.2 (páginas 20 e 21), em condições específicas de características mecânicas de agregados e carregamentos N prévios do sistema. Para tanto, o solo foi compactado em diferentes umidades e energias de compactação, seco em condições controladas e rompido em agregados. Reumedecidos, os agregados foram acondicionados em recipientes especiais, com diferentes níveis de tensão de carregamento N durante 1/4 minuto. Em condições de umidade e temperatura constantes, o solo incubou durante 0, 1, 6, 14 e 28 dias, quando então, livre de qualquer confinamento artificial, foi submetido à fratura por compressão ou por tração.*

##### 4.1. Solo

O solo utilizado é de camada entre 2 e 20 cm de profundidade de um Podzólico Vermelho-Escuro, com 53% de areia, 25% de silte, 22% de argila e 2% de matéria orgânica, localizado na Estação Experimental Agronômica da

Universidade Federal do Rio Grande do Sul e que tem estado sob pastagem, com pisoteio animal, há mais de cinco anos.

#### 4.2. Obtenção de agregados compactados

Utilizando material e seguindo procedimentos descritos em LAMBE (1951), determinou-se a curva de compactação do solo para as energias de  $0,63 \text{ MJ/m}^3$  e  $1,70 \text{ MJ/m}^3$ . Foram identificadas e selecionadas duas unidades para compactar o solo e dele obter-se agregados adensados e com presumíveis diferenças no grau de dureza e de orientação de partículas. Uma unidade é inferior e outra superior à unidade ótima para ambas as energias de compactação (Figura 15). Essas umidades (12,3% e 14,6%) são suficientemente próximas à ótima para ainda assegurar elevada densidade

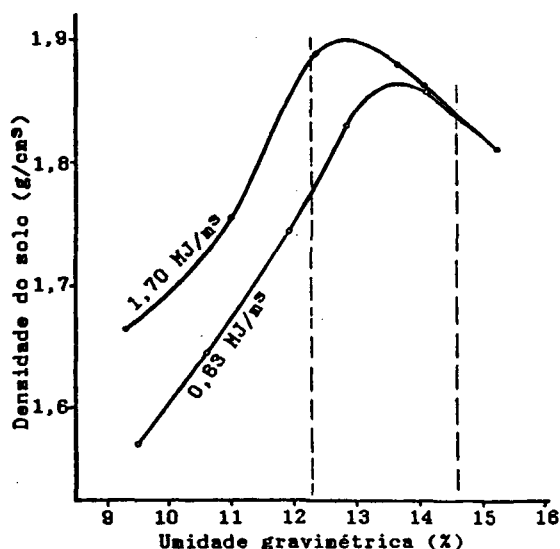


FIGURA 15 - Densidade do solo em função do teor de umidade e dois níveis de energia de compactação

do solo para os níveis de energia de compactação adotados.

Foram obtidos vários cilindros de solo compactado em cada combinação de energia e umidade, com as respectivas densidades mostradas na Tabela 1.

TABELA 1 - Densidade do solo compactado ( $\text{g/cm}^3$ ) em diferentes umidades e energias de compactação

Energia ( $\text{MJ/m}^3$ )	Umidade gravimétrica (%)	
	12,3	14,6
0,63	1,73=D <sub>s1</sub>	1,81=D <sub>s4*</sub>
1,70	1,88=D <sub>s2</sub>	1,82=D <sub>s3</sub>

\* Por resultar uma condição mecânica que se assemelha às de D<sub>s3</sub>, D<sub>s4</sub> foi eleita para ser abandonada em função de dificuldades operacionais

Juntamente com solo não compactado (NA), os cilindros de solo compactado foram mantidos no interior de uma câmara de crescimento, com temperatura de 20°C e umidade relativa próxima a 100%, durante 40 dias. Então, os cilindros foram seccionados em três segmentos e, durante os oito dias subsequentes, a umidade relativa no interior da câmara foi mantida em 50%. Ao término daqueles oito dias, a umidade gravimétrica era de 3,2% para o solo não compactado, 3,5% para D<sub>s1</sub>; 4,4% para D<sub>s2</sub> e 6,1% para D<sub>s3</sub>. O destorroamento e obtenção de agregados deu-se pelo rompimento manual dos cilindros e forçando os blocos de solo compactado sobre uma peneira com abertura de 4,8 mm. Agregados de solo não



compactado (NA) também foram passados através da mesma peneira e, da mesma forma que para os agregados compactados, foram desprezados os menores que 0,3 mm. O diâmetro médio ponderado dos agregados aproveitados foi de 1,4 mm para D<sub>s1</sub>, 2,0 mm para D<sub>s2</sub> e 1,6 mm para D<sub>s3</sub> e NA.

A unidade foi uniformizada em 11,0% pela adição de água em borrifos. O solo foi deixado em sacos plásticos duplos e no interior da câmara de crescimento a 25°C durante três dias para homogeneizar a unidade. Na mesma câmara e com temperatura de 25°C e umidade relativa próxima a 100%, solo de cada densidade foi então subdividido em 5 porções, correspondentes a cada tempo de incubação, sob condicionamento descrito abaixo.

#### 4.3. Condicionamento do solo para fratura por tração

Com temperatura de 25°C e umidade relativa próxima a 100% no interior da câmara de crescimento, o solo foi novamente passado por peneira com abertura de 4,8 mm para assegurar uma condição inicial de separação entre os agregados e, então, imediatamente acondicionado em recipientes de PVC, com 4,0 cm de diâmetro e 6,0 cm de altura, e com suas paredes externas previamente revestidas com filme de polietileno (Figura 16). O recipiente é composto de duas metades simétricas, que são mantidas em posição pela ação de uma luva também de PVC. Além de prevenir eventuais

deslocamentos da amostra no interior do recipiente durante a tração, a conformação que reduz o diâmetro interno das extremidades adjacentes de cada metade do recipiente tende a induzir o plano sobre o qual o esforço é aplicado e, conseqüentemente, onde a fratura ocorre. Estados mínimos ou diferentes estados de consolidação inicial, necessários à obtenção de corpos possíveis de serem submetidos a ensaios de tração, são obtidos por tensões condicionantes  $N$  aplicadas conforme sugere a Figura 17. As tensões de condicionamento  $N$  foram de  $0,20 \text{ kgf/cm}^2$  e  $0,50 \text{ kgf/cm}^2$ . A compressão do solo recém peneirado e preenchendo todo o recipiente deu-se em  $1/12$  minuto até atingir-se a tensão  $N$  desejada e, então, foi mantida constante por  $1/4$  minuto. A ação conjunta dos pistões superior e inferior no processo compressivo permite pressupor que o gradiente de compacidade da amostra contribua com a conformação do recipiente para definir o plano de fratura na região central.

Uma vez aplicado o carregamento  $N$ , as extremidades das amostras a incubar foram protegidas com isopor, numa espessura de  $0,4 \text{ cm}$ . Toda a unidade foi então parafinada para prevenir a perda de umidade. Para cada tipo de agregado ( $NA$ ,  $D_{s1}$ ,  $D_{s2}$  e  $D_{s3}$ ), 5 réplicas de unidade experimental foram deixadas em posição vertical em bandejas plásticas, dispostas em prateleiras da câmara de crescimento, com temperatura constante de  $25^\circ\text{C}$ , durante períodos de  $0$ ,  $1$ ,  $6$ ,  $14$  e  $28$  dias, quando foram então submetidas ao respectivo ensaio de fratura por tração.

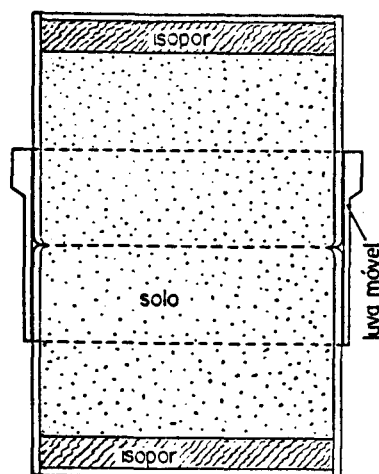


FIGURA 16 - Corte esquemático de recipiente com solo já acondicionado

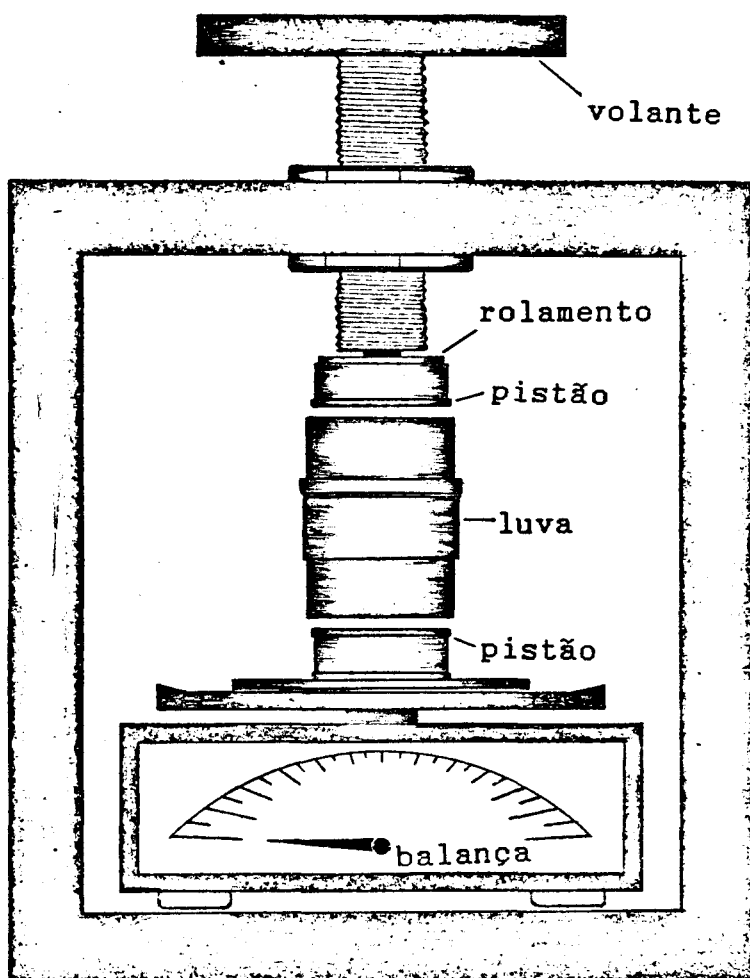


FIGURA 17 - Aplicação de tensões de carregamento N prévio à incubação

#### 4.4. Condicionamento do solo para fratura por compressão

Os corpos cilíndricos de solo a serem submetidos à fratura por compressão, também foram obtidos através de prévias tensões de carregamento  $N$ , aplicadas sobre massa de agregados no interior de recipiente de PVC, composto de um único segmento de tubo com paredes internas lisas, diâmetro e comprimento similares aos do recipiente da Figura 16. A tensão  $N$  no processo de compressão de condicionamento foi de  $0,50 \text{ kgf/cm}^2$ , aplicada de forma similar e em nível coincidente à maior das tensões  $N$  aplicadas às amostras destinadas à fratura por tração.

A unidade recipiente+solo teve suas extremidades protegidas por isopor e, com tensão considerada negligenciável em relação às de carregamento, aplicada sobre uma única extremidade, a amostra foi expulsa do recipiente, cuidadosamente envolta em papel aluminado, parafinada e deixada descansar em posição vertical. Para cada tipo de agregado ( $NA$ ,  $D_{s1}$ ,  $D_{s2}$  e  $D_{s3}$ ), 5 réplicas de unidade experimental incubaram, coincidentemente às unidades destinadas à fratura por tração, por períodos de 0, 1, 6, 14 e 28 dias no interior da câmara de crescimento com temperatura constante de  $25^{\circ}\text{C}$ .

#### 4.5. Determinações

##### 4.5.1. Fratura por tração

A tração foi aplicada após a remoção do filme de polietileno e parafina e deslocamento da luva do recipiente sobre uma única metade do mesmo (Figura 18). A força aplicada é dada pelo peso gerado pela água que foi sendo colocada dentro do recipiente coletor, junto à parede interna, em vazão de aproximadamente  $7,5 \text{ cm}^3/\text{s}$ . Ao romper a amostra, e dado que a massa dos componentes do equipamento sujeitos a deslocamentos verticais em sentido oposto são similares, a força de tração é dada pela massa d'água, descontada a massa da metade superior do recipiente e respectivo conteúdo.

##### 4.5.2. Fratura por compressão

Retirado cuidadosamente o papel alumínio e a parafina, a amostra foi submetida à compressão (Figura 19). A amostra descansava sobre um dispositivo que permitia o posicionamento adequado de seu eixo vertical e plano superior, de forma a ter-se repetibilidade de momento resultante por unidade de força aplicada. A força crescente para provocar a fratura também foi gerada pela água que, similarmente ao item anterior, foi sendo adicionada ao recipiente coletor. A força de fratura é dada pelo produto do

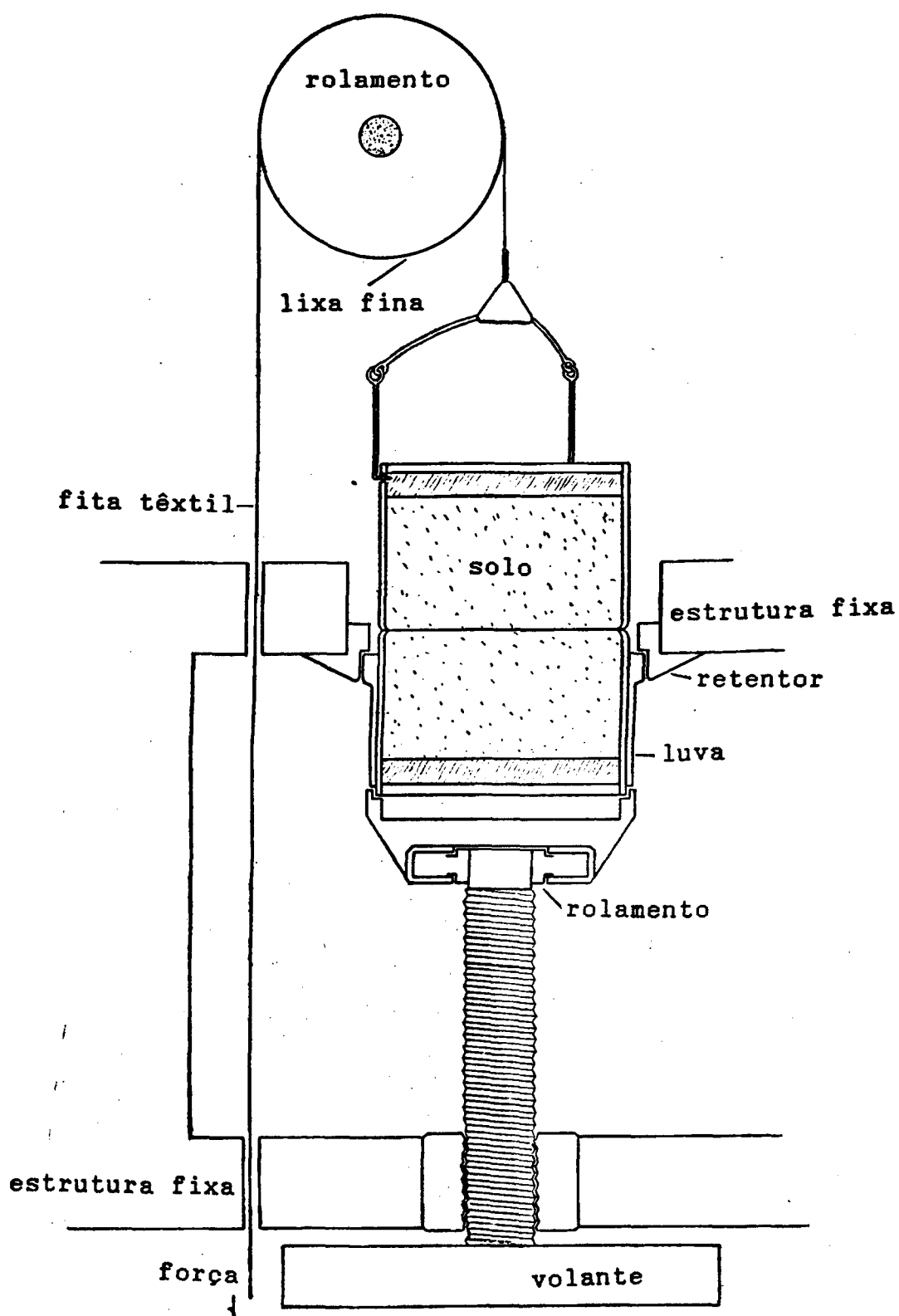


FIGURA 18 - Corte esquemático de equipamento para submeter a amostra de solo à fratura por tração, com unidade experimental em posição de teste.

peso d'água aplicado à equação de momento resultante da ação da alavanca+reservatório+água adicionada, previamente obtida em ensaio em que uma balança com precisão de 1/100g fazia o papel da amostra de solo.



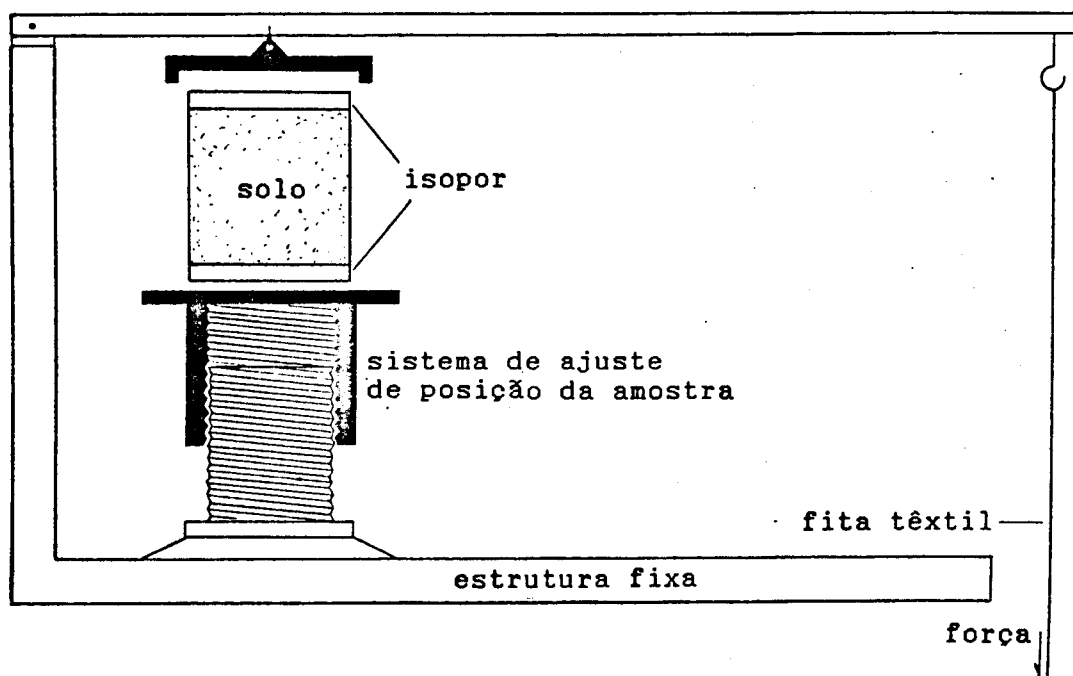


FIGURA 19 - Corte esquemático de equipamento para submeter a amostra de solo à fratura por compressão, com unidade experimental em posição de teste.

## 5. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

### 5.1. Transformação de tensões de compressão $\sigma$ em resistência coesiva do solo

O significado mais imediato da relação

$$\frac{(d[AceS](\sigma)/d\sigma)_{t=0}}{(d[AceS](\sigma)/d\sigma)_{t=0}}$$

e sua variação no tempo, com resultados apresentados na Figura 5.1, é que, quanto maior a taxa de crescimento daquela razão, menor é a capacidade relativa do solo, com o tempo, em compor resistência à deformação a partir das próprias tensões  $\sigma$  que tendem a deformá-lo. Ou seja, a relação permite comparar, em termos relativos, as taxas de perda de capacidade do sistema articulada na absorção de tensões de compressão  $\sigma$  e transformação dessas em resistência coesiva.

Convém lembrar que  $\Delta[Ace.S](\sigma)$  não é obtido diretamente, mas sim subtraindo a coesividade originalmente existente na amostra, e que pode ser estimada por tração, da tensão de compressão  $\sigma$  que gera a fratura. Como essa coesividade incorpora um componente  $\Delta[Ace.S](t)$ , a função da

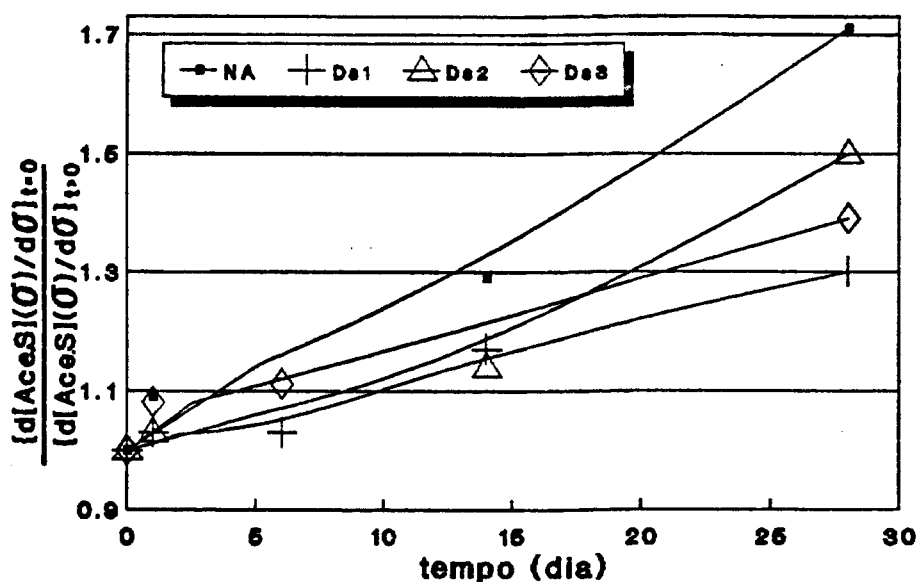


FIGURA 20 - Razão de incrementos de produto coesivo Ace.S derivado de tensão compressiva  $\sigma$  por unidade dessa, aplicada na promoção de fratura do solo imediatamente após a sua fragmentação e condicionamento e fraturas em tempos quaisquer. NA = agregados não compactados; Ds1=1,73 g/cm<sup>3</sup> e Ds2=1,88 g/cm<sup>3</sup> compactados em umidade abaixo da ótima e; Ds3=1,82 g/cm<sup>3</sup> compactados em umidade acima da ótima.

Figura 20 traduz outras relações temporais que serão consideradas no item 6.

A fração de tensão de compressão  $\sigma$  que é transformada em produto coesivo ( $d[Ace.S](\sigma)/d\sigma$ ) com o tempo, em termos absolutos, e para cada condição de agregado, é mostrada na Figura 22.

No item 3.2, Figuras 5 e 6, propôs-se, respectivamente, que a relação temporal para  $d[AceS](\sigma)/d\sigma$  fosse afetada pela densidade e pela condição de umidade em que o solo foi compactado. Por isso, é importante lembrar que  $D_{s1}=1,73\text{g/cm}^3$  e  $D_{s2}=1,88\text{g/cm}^3$  foram obtidas com umidade de compactação inferior à ótima, e  $D_{s3}=1,82\text{g/cm}^3$  foi obtida com umidade acima da ótima. É importante, também, lembrar que, para fins de comparação entre o proposto e o obtido experimentalmente, pressupõe-se que  $D_{s2}$  implica maior dureza de agregado em relação a todas as outras condições, enquanto que  $D_{s3}$  implica maior grau de orientação de partículas.

Considerados os resultados à Figura 20, e dado que  $D_{s2}$  é bem superior à densidade do solo não compactado (NA), ou mesmo  $D_{s1}$  e  $D_{s3}$ , fica evidente a necessidade de ter-se considerado outros aspectos além de densidade e umidade em que o solo foi compactado, como sendo aqueles fatores que determinam o grau de orientação das partículas e, em decorrência, o comportamento da relação. Ocorre que o grau de orientação das partículas na região de contato também é função da tensão ocorrente na interface agregado-agregado

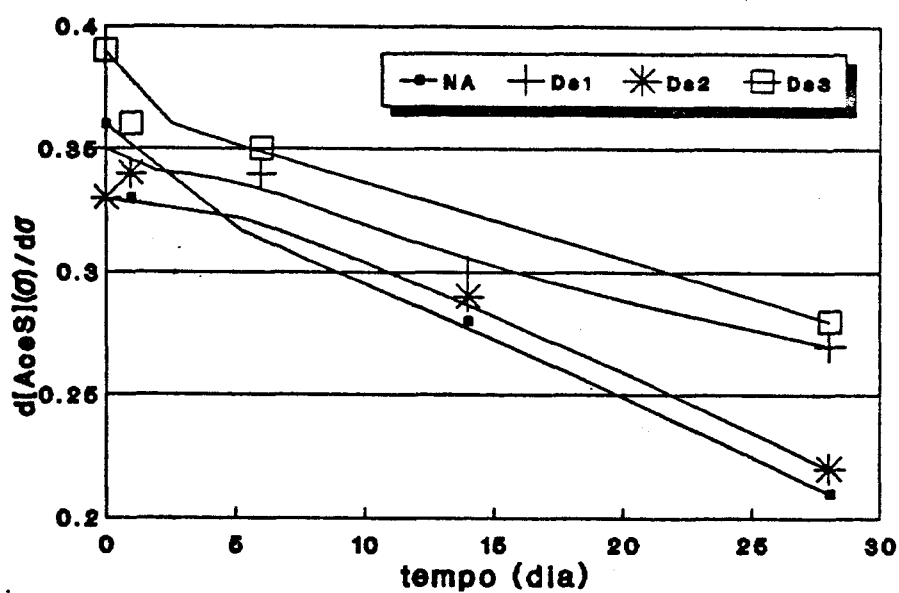


FIGURA 21 - Variação do índice de transformação de tensões  $\sigma$  em produto coesivo Ace.S entre agregados. NA= agregados não compactados;  $D_{s1}=1,73\text{g/cm}^3$  e  $D_{s2}=1,88\text{g/cm}^3$  compactados em umidade abaixo da ótima;  $D_{s3}=1,82\text{g/cm}^3$  compactados em umidade acima da ótima.

por ocasião do condicionamento sob tensão  $N$ . Entre agregados mais duros e maiores as tensões de compressão nas interfaces tendem a ser maiores para dada tensão de carregamento  $N$ . Como é sugerido no item 3.3 e será discutido no item 5.2, o grau de dureza  $q$  e o tamanho do agregado são características que afetam, ainda que indiretamente, a expressão quantitativa de  $\Delta[Aceo.S](t)$ , e este incremento, por sua vez, afeta o valor de  $d[Ace.S](\sigma)/d\sigma$ , conforme o que é discutido no item 3.2.

Uma elevada capacidade do solo em transformar frações da tensão de compressão  $\sigma$  em produto coesivo  $Ace.S$ , com conseqüente aumento de resistência à fratura, decorre da capacidade do sistema em permitir incrementos do produto  $[Ace.S](\sigma)$  sem maiores perdas do produto  $[Aceo.S](t)$ . Perceba-se que um elevado incremento do produto  $[Aceo.S](t)$  exige do sistema particulado comportamento de elevada flexibilidade plástica e elástica na região interfacial sujeita a incrementos  $[Ace.S](\sigma)$ . Ou seja, o sistema deve ser capaz de absorver energia compressiva, mesmo na forma de trabalho plástico, sem que haja ruptura de ligações já existentes em grau que o leve ao colapso.

Quando do condicionamento em condições confinadas e com tensões verticais  $N$  de  $0,50\text{kg/cm}^2$ , sistemas de agregados  $D_{s2}$ , mais duros e maiores, sofreram elevada tensão no contato agregado-agregado. Tal tensão provocou alto grau de aproximação e orientação de partículas nos contatos

efetivos, proporcionando condições à elevação do produto coesivo  $Ace.S$ , mesmo que não tenha ocorrido grande expansão da área de contato aparente  $Ac$ . Com o tempo, o fortalecimento de  $Ace.S$  por incrementos  $\Delta[Aceo.So](t)$  em limitada área de contato aparente  $Ac$  resultou em um sistema rígido e, ao mesmo tempo, frágil. Em tal sistema, pouco flexível, qualquer deformação implicaria em expressiva ruptura de ligações agregado-agregado já estabelecidas e fortalecidas, levando o sistema ao colapso.

Agregados não compactados (NA), de baixa dureza e com baixa orientação de partículas, tendem a sofrer grandes deformações quando carregados, absorvendo nesse trabalho plástico grande parte de uma tensão de carregamento  $N$  aplicada imediatamente após a fragmentação. Assim, quando do condicionamento de agregados não compactados NA, ocorreu elevado incremento de área de contato aparente ( $Ac$ ), mas com moderado incremento de produto  $Ace.S$ , devido às baixas tensões nos contatos.

Imediatamente após o condicionamento sob tensão  $N$ , a capacidade do sistema de agregados não compactados NA em transformar tensões de compressão  $\sigma$  em resistência resulta, assim, principalmente de incrementos do primeiro fator do produto derivado de  $N$ , ou seja,  $d[Ace](N)$  é alto enquanto  $d[S](N)$  é baixo.

Com o tempo, agrega-se ao produto  $Aceo.So$ , já existente na condição de condicionamento, um incremento de coesividade  $\Delta[Aceo.So](t)$  como produto termodinâmico. Esse

incremento tende a ser relativamente elevado entre agregados não compactados NA, dada a grande extensão de área de contato aparente em que se processa. Veremos, em 5.2, que  $\Delta[Aceo.So](t)$  é predominantemente determinado por mecanismos promotores de incrementos de área de contato efetivo Ace a partir daquela área de contato aparente Ac.

Portanto, fraturas por compressão em solos de agregados não compactados NA, provocadas em tempos  $t > 0$ , demandaram maiores tensões de compressão  $\sigma$  em decorrência de elevado  $\Delta[Aceo.So](t)$ , que não é diretamente derivado de  $\sigma$ . E, como  $\Delta[Ace.S](\sigma) = (\sigma/2) - \{\Delta[Aceo.So](t) + Aceo.So\}$ , maiores incrementos  $\Delta[AceoSo](t)$  em agregados não compactados NA resultaram em maiores decréscimos dos valores de  $d[AceS](\sigma)/d\sigma$  em tempos maiores que zero.

Depreende-se, então, que quando em 3.2 propôs-se que a taxa de variação da razão mostrada na Figura 20 cresceria mais rapidamente em agregados mais densos e, nesses, nos obtidos de solo compactado em unidades acima da ótima, faltou considerar relações tensão-deformação em função de outras características de agregados; no caso, a dureza e diâmetro, além de implicações da tensão de condicionamento N, que foi necessária à operacionalização experimental, todos com efeitos sobre mecanismos promotores de  $\Delta[Aceo.So](t)$ .

O comportamento de  $D_{s2}$  e  $D_{s3}$  em relação ao de  $D_{s1}$  não negam o predito. No entanto, é importante considerar que, como vimos, os comportamentos refletem relações



altamente afetadas pelas relações tensão-deformação por ocasião do condicionamento. No caso, a tensão de carregamento  $N$  no condicionamento foi de  $0,50 \text{ kgf/cm}^2$ . Tensões mais baixas, que não foram adotadas nessa fase pela dificuldade operacional de obter-se adequados corpos de prova cilíndricos, poderiam implicar diferentes resultados. Note-se que para  $D_{=2}$ , de elevada dureza, uma tensão  $N$  baixa implica incrementos de contato efetivo  $\Delta[Ace](N)$  muito baixos e, ainda que incrementos de tração  $\Delta[S](N)$  resultassem relativamente elevados, a reduzida área de contato aparente proporcionaria condições de reduzidos incrementos  $\Delta[Aceo.So](t)$ . Isso, por sua vez, implicaria que  $\{d[Ace.S](\sigma)/d\sigma\}_{t \rightarrow 0}$  não fosse tão menor que  $\{d[Ace.S](\sigma)/d\sigma\}_{t=0}$ , reduzindo a taxa de crescimento da razão mostrada na Figura 20.

Já se diz<sup>55e</sup> que quanto mais elevada a taxa de crescimento da razão  $\{d[Ace.S](\sigma)/d\sigma\}_{t=0}/\{d[Ace.S](\sigma)/d\sigma\}_{t \rightarrow 0}$ , maior é a taxa de perda de capacidade do solo em absorver tensões de compressão  $\sigma$  e transformar frações dessas em resistência coesiva, mas, por outro lado, maior é também a taxa de recuperação de resistência estrutural absoluta a tensões compressivas. Ambas as relações acima decorrem de efeitos de um mesmo produto termodinâmico, simplifiadamente expresso por  $\Delta[AceoSo](t)$ . Enquanto que a redução da capacidade de transformar tensões de compressão  $\sigma$  em resistência coesiva decorre de restrições a incrementos de contatos aparente e efetivo sem que haja desestabilização do solo enrijecido por  $\Delta[Aceo.So](t)$ , este mesmo

enrijecimento torna o sistema capaz em suportar tensões crescentes com o tempo.

Certamente, a capacidade de transformar tensão de compressão  $\sigma$  em resistência coesiva só tem relevância agromômica, na medida em que o trabalho plástico passível de ocorrer dê-se em condições de boas relações volumétricas entre as fases do solo, ou seja, quando o espaço poroso ainda é alto. Tais características do solo macroparticulado exigem comportamento flexível do sistema de agregados, que implica, ao seu devido tempo, baixos  $\Delta[Ac](N)$  ou baixa compressibilidade dos agregados, elevados  $\Delta[Ace_o.S_o](t)$  ou elevada propensão à reconsolidação espontânea e, finalmente, elevados  $\Delta[Ace.S](\sigma)$  ou elevada elastoplasticidade na região interfacial dos agregados em reconsolidação e sob tensão de compressão.

Em manifestação de comportamento flexível, destaque-se  $D_{s3}$  que, mesmo apresentando uma maior taxa de elevação da relação mostrada na Figura 20 quando comparada a  $D_{s1}$ , sua capacidade absoluta em transformar tensão compressiva em resistência à mesma (Figura 21) foi sempre maior do que para qualquer outra condição de agregados. Presume-se que, operacionalizando experimentalmente carregamentos de condicionamento  $N$  inferiores a  $0,50\text{kgf/cm}^2$ , com conseqüente maior volume poroso no sistema, o comportamento de  $D_{s3}$  seria proporcionalmente ainda mais diferenciado em relação às outras condições de agregados. Ocorre que para um sistema macroparticulado e fragmentado, compressões não

confinadas só são possíveis mediante a manifestação de coesividade. E, percebe-se então, que um elevado grau de orientação de partículas, importante para os mecanismos de expressão de  $\Delta[\text{AceoSo}](t)$ , já é presente em  $D_{\text{es}}$  e, portanto, menos dependente de elevadas tensões no contato agregado-agregado.

As relações até agora abordadas decorrem de processos em que as crescentes tensões desviatórias (diferença entre tensões principais ortogonais) necessárias à fratura com o tempo não envolvem também crescentes tensões principais de confinamento da amostra. Isto dificulta uma abordagem clássica de processo de fratura de solo. Uma tentativa em esboçar analogias que situem o que se discutiu até aqui em relação a uma expressão clássica da fratura sem confinamento da amostra é apresentada no item 6.

Mas, importante para se considerar, é que a maior ou menor taxa de crescimento da razão mostrada na Figura 20, ou da capacidade absoluta do solo em transformar energia compressiva em resistência coesiva (Figura 21), não dependem apenas das características dos agregados sob tensão  $\sigma$ , mas também da própria magnitude da tensão de carregamento  $N$ , combinada às características dos agregados. Ou seja, melhor ou pior condição física do solo não seria atributo apenas de características do próprio solo, mas também das relações tensão-deformação que podemos afetar por procedimentos de manejo. Essas relações dão sustentação a argumentos de que as características mecânicas dos

agregados ensejam uma revisão ou ampliação do conceito de boas condições físicas do solo, quando relações tensão-deformação-tempo como as ocorrentes em solo mecanizado são consideradas.

## 5.2. Mecanismos de recomposição espontânea de resistência coesiva do solo

Trata-se agora dos incrementos do produto coesivo com o tempo  $\Delta[A_{ceo}.S_o](t)$ , e respectivos mecanismos de promoção, com efeitos detectáveis nos incrementos de tração aplicável a uma amostra de solo. A tração máxima ( $T_{max}$ ) aplicável a uma amostra de solo a qualquer tempo  $t$  após o revolvimento e condicionamento resultou definida no item 3.2 como  $A_{ceo}.S_o = [A_{ceo}.S_o]_{t=0} + \Delta[A_{ceo}.S_o](t)$ .

Em 3.3 simplificou-se  $\Delta[A_{ceo}.S_o](t)$  em expressões equivalentes a

$$\frac{\Delta T_{max}}{\Delta t} = \frac{\Delta[A_{ceo}.S_o]}{\Delta t} = \frac{\Delta[(A_{ce1} + A_{ce1} + A_{ce2}).S_1]}{\Delta t}$$

Comparados os resultados obtidos aos idealizados para a condição de predominância de cada um dos subprodutos de  $\Delta(A_{ce1} + A_{ce1} + A_{ce2}).S_1/\Delta t$ , julgou-se, por semelhança de tendências, que o mecanismo predominantemente expresso é  $T_3 = A_{ce2}S_1$ , representado grafica e genericamente nos casos d e g do item 3.3.1, referido como microrrearranjo.

Os propostos incrementos em  $Ace_1$ ,  $Ace_2$  e em  $S_1$  com o tempo, mesmo que possam representar uma boa aproximação dos processos envolvidos, não poderiam ter seus efeitos separadamente quantificados, pois não há razão para que os mecanismos propostos não ocorram simultânea e independentemente. Então, a predominância do mecanismo  $T_3 = Ace_2 S_1$  não significa que outros mecanismos não tenham ocorrido em níveis mais baixos.

Além da diferença na relação massa/volume, deve haver uma grande diferença no grau de orientação de partículas entre as condições  $D_{s3}$  e  $D_{s1}$ . Com essa última diferença em mente, e vendo-se as Figuras 22 ou 23, as comparações entre incrementos do produto coesivo  $\Delta[Ace_0.S_0](t)$  nessas duas condições de agregados, dão-se associando os respectivos resultados às representações genéricas dos casos d.a e g.a do item 3.3.1. Ou seja, em termos de potencial termodinâmico, os comportamentos de  $D_{s1}$  e  $D_{s3}$  distinguem-se mais pelo o que decorre do respectivo grau de orientação de partículas de que pela diferença de grau de dureza.

Quando tomamos a Figura 24, em que a diferença de grau de dureza entre os agregados  $D_{s1}$  e  $D_{s2}$  é a característica que mais os diferencia na promoção dos mecanismos em questão, a relação deve ser associada ao caso d.b. do item 3.3.1.

O grau de dureza e diâmetro do agregado, associados à tensão de carregamento  $N$  no condicionamento, que já foram

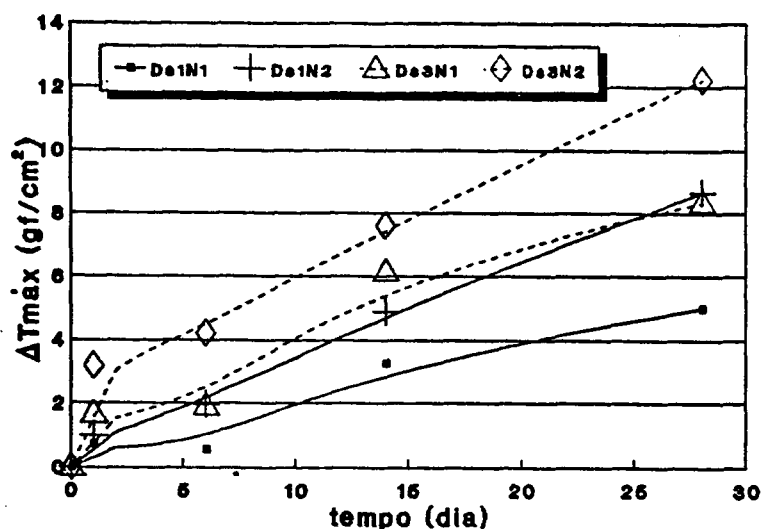


FIGURA 22 - Incremento de tensão de tração máxima aplicável a uma amostra de solo composta de agregados originados no rompimento de blocos com densidades  $D_{s1}=1,73 \text{ g/cm}^3$  e  $D_{s3}=1,82 \text{ g/cm}^3$ , e previamente submetida a compressões confinadas  $N_1=0,20 \text{ kgf/cm}^2$  e  $N_2=0,50 \text{ kgf/cm}^2$ .

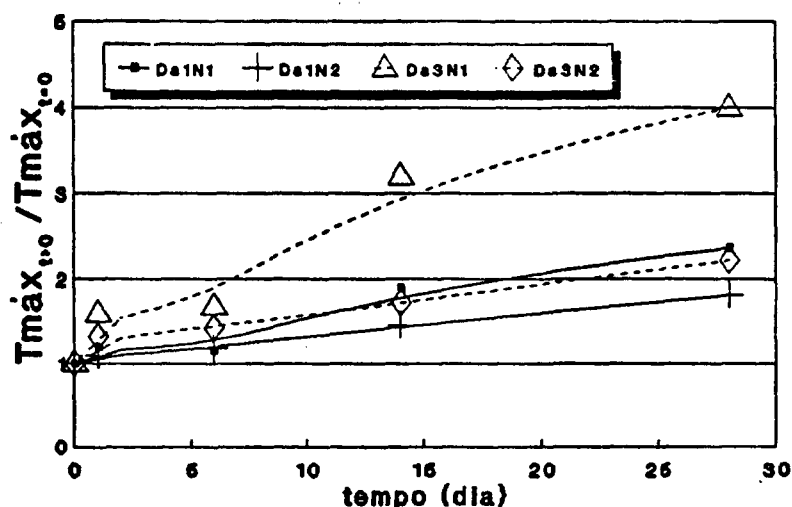


FIGURA 23 - Razão entre tensões de tração máximas aplicáveis a um tempo  $t > 0$  e  $t = 0$  em amostras de solo compostas de agregados oriundos na fragmentação de blocos com densidade  $D_{s1}=1,73 \text{ g/cm}^3$  e  $D_{s3}=1,82 \text{ g/cm}^3$ , previamente submetida a compressões confinadas  $N_1=0,20 \text{ kgf/cm}^2$  e  $N_2=0,50 \text{ kgf/cm}^2$ .

considerados nas relações discutidas em 5.1, são claramente muito importantes em determinar  $\Delta T_{\max}/\Delta t$ . Isso já está claro na figura 24, mas é também evidente nas figuras 25 e 26, em que, respectivamente, agregados compactados  $D_{s2}$  são comparados com agregados não compactados NA e compactados  $D_{s3}$ . Ocorre que quando a tensão de carregamento N e o grau de dureza q são elevados, tem-se sempre uma elevada tensão de contato. Mas, desde que a tensão N seja suficientemente elevada para provocar significativa deformação na região de contato entre agregados duros, tem-se como resultado também uma considerável expansão de contato agregado-agregado e, mesmo com o descarregamento da tensão de condicionamento N,

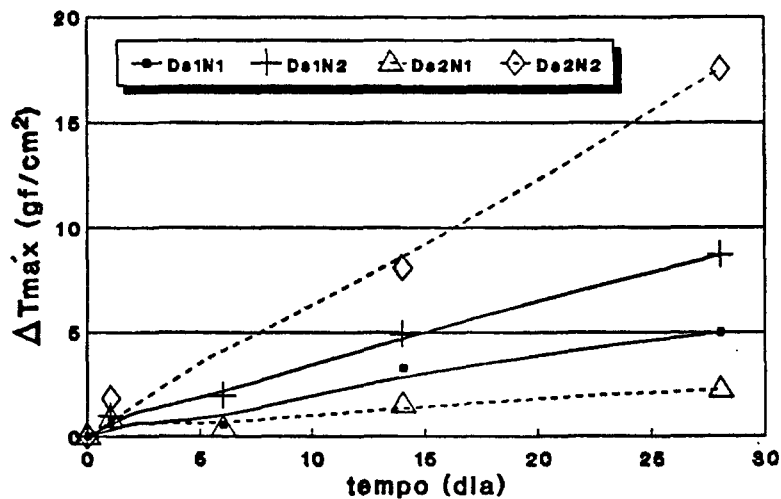


FIGURA 24 - Incremento de tensão de tração máxima aplicável a uma amostra de solo composta de agregados originados na fragmentação de blocos com densidade  $D_{s1}=1,73 \text{ g/cm}^3$  e  $D_{s2}=1,88 \text{ g/cm}^3$ , e previamente submetida a compressões confinadas  $N_1=0,20 \text{ kgf/cm}^2$  e  $N_2=0,50 \text{ kgf/cm}^2$ .

um intenso grau de orientação de partículas nas regiões deformadas pela tensão.

É importante considerar também que a fração da área de contato agregado-agregado que resulta adequadamente próxima após a tensão de carregamento  $N$ , com potencial para tornar-se área de contato efetivo por micro-rearranjo  $A_{ce2}$ , conforme Figura 7, é maior em condições de elevadas tensões de contato. Note-se que, com o aumento da tensão, a fração da área de contato aparente que passa a contato efetivo tende a ser menos dependente da microestrutura do agregado, levando à tendência de  $A_{ce}$  aproximar-se de  $A_c$ . Isso compensaria as ainda possíveis menores extensões de contato agregado duro-agregado duro sob altas tensões  $N$ . O maior valor de  $\Delta T_{max}/\Delta t$  para  $D_{22}N_2$  em relação a  $D_{33}N_2$  (Figura 26) decorreria, assim, ao nível de mecanismos, face o maior grau de aproximação e orientação das partículas na região interfacial e sua propensão ao rearranjo. Ou seja, em tese, pela mesma razão que  $\Delta T_{max}/\Delta t$  em  $D_{33}N_2$  é superior ao verificado em  $D_{11}N_2$  (Figura 22).

Quando o condicionamento deu-se em baixa tensão de carregamento ( $0,20 \text{ kgf/cm}^2$ ), gerando reduzida extensão de interface agregado duro-agregado duro,  $\Delta T_{max}/\Delta t$  foi bem mais baixo para  $D_{22}$  do que para  $D_{33}$ , corroborando o que se conclui no parágrafo imediatamente acima.

Claro que em  $D_{33}N_1$ , a interface agregado-agregado também não seria tão maior que em  $D_{22}N_1$ . Contudo, independentemente da intensidade de tensão no contato,  $D_{33}$  já



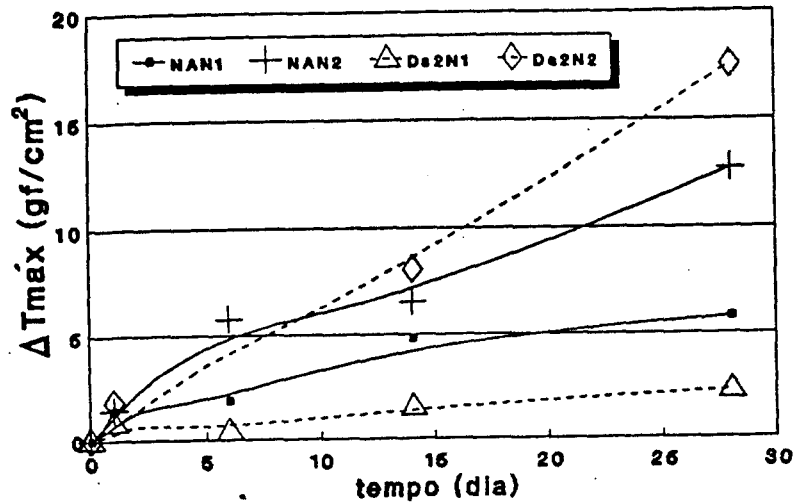


FIGURA 25 - Incremento de tensão de tração máxima aplicável a uma amostra de solo composta de agregados não compactados (NA) e agregados originados na fragmentação de blocos com densidade  $D_{s2}=1,88 \text{ g/cm}^3$ , e previamente submetida a compressões confinadas  $N_1=0,20 \text{ kgf/cm}^2$  e  $N_2=0,50 \text{ kgf/cm}^2$ .

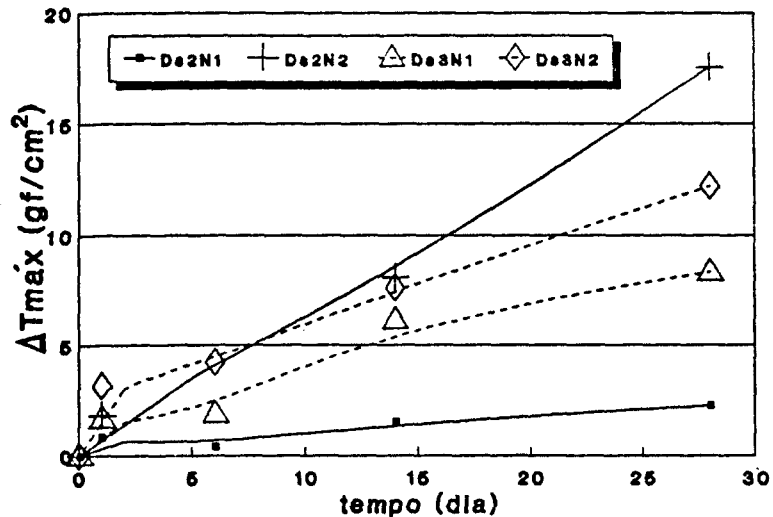


FIGURA 26 - Incremento de tensão de tração máxima aplicável a uma amostra de solo composta de agregados originados na fragmentação de blocos com densidade  $D_{s2}=1,88 \text{ g/cm}^3$  e  $D_{s3}=1,82 \text{ g/cm}^3$ , e previamente submetida a compressões confinadas  $N_1=0,20 \text{ kgf/cm}^2$  e  $N_2=0,50 \text{ kgf/cm}^2$ .

apresenta uma maior orientação de partículas e conseqüente maior potencial à geração de produto  $Ace_1.S_1$ . Ou seja,  $D_{s3}$  é menos afetado que  $D_{s2}$  pelo carregamento  $N$  de condicionamento em promover  $\Delta[AceoSo](t)$ , pois os efeitos de  $N$  sobre o produto  $AceS$  são os de provocar aproximação e orientação de partículas, sendo que esta última condição pré-existe em elevado grau em  $D_{s3}$ .

Portanto, dependendo das características dos agregados, e também de relações entre elas e tensões a que o sistema esteja sujeito, o produto termodinâmico  $\Delta[AceoSo](t)$  é principalmente determinado por processos referidos em 3.3 como microrrearranjo. É de ressaltar-se, no entanto, que a operacionalização experimental do que se propôs implicou condicionamento do solo com pré-carregamentos. Mesmo a mais baixa tensão de pré-carregamento  $N$  ( $0,20\text{kgf/cm}^2$ ) limitou a ocorrência do mecanismo  $Ace_1$  (macrorrearranjo) pelo adensamento global do sistema. E este processo de macrorrearranjo deve ser expressivo quando o solo não sofre carregamento imediatamente após o revolvimento, o que é comum na prática de manejo do solo agrícola.

## 6. UMA EXTENSÃO DA RELAÇÃO TEMPORAL DA COESIVIDADE E SUAS RELAÇÕES COM A COMPRESSÃO E RESISTÊNCIA DO SOLO

*Proposta em 3.1 é vista em 5.1 e 5.2, a coesividade do solo não só é função do tempo, independentemente de variações de umidade, como também tem seus mecanismos de expressão quantitativa afetados pela história de tensões sobre o solo.*

*Nesta fase, o conceito mais dinâmico de coesividade é aplicado em uma expressão tradicionalmente reconhecida no estudo de relações tensão-resistência em mecânica do solo.*

A coesividade é particularmente contemplada na clássica expressão  $\tau = c + \sigma \tan \phi$  de Mohr-Coulomb, utilizada na estimativa de resistência do solo a esforços cisalhantes, em que  $\tau$  é a resistência à tensão cisalhante;  $c$  é a coesividade;  $\sigma$  é a tensão normal atuante sobre o plano de fratura e;  $\phi$  é o ângulo de atrito interno.

Num sistema ortogonal,  $\sigma$  e  $\tau$  são coordenadas resultantes de interações entre tensões principais ortogonais.

Em processo de compressão vertical, a fratura do solo ocorre quando a tensão vertical  $\sigma_1$  diferencia-se da horizontal  $\sigma_3$  o suficiente para provocar uma deformação semi-infinita, ou seja, a fratura. Adotando uma representação gráfica da hipótese de Mohr (Figura 27), a relação entre as coordenadas tensão normal de fratura  $\sigma$  e tensão cisalhante de fratura  $\tau$  pode ser obtida pela intersecção do semicírculo com diâmetro  $\sigma_1 - \sigma_3$  e centro  $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$  e a corda com origem em  $\sigma_3$  e direção  $\theta = 45^\circ + \phi/2$  em relação ao eixo das abscissas.

Dado que  $\sigma_1 = \sigma_3 + (\sigma_1 - \sigma_3)$ ,  $\sigma_1$  aplicável só pode crescer se  $\sigma_3$  também crescer. Atendo-se ao rigor da equação, um conjunto de mais que um par de coordenadas, condição necessária à obtenção de  $\phi$  diferente de zero, impõe uma  $\sigma_3$  variável e, portanto, também diferente de zero.

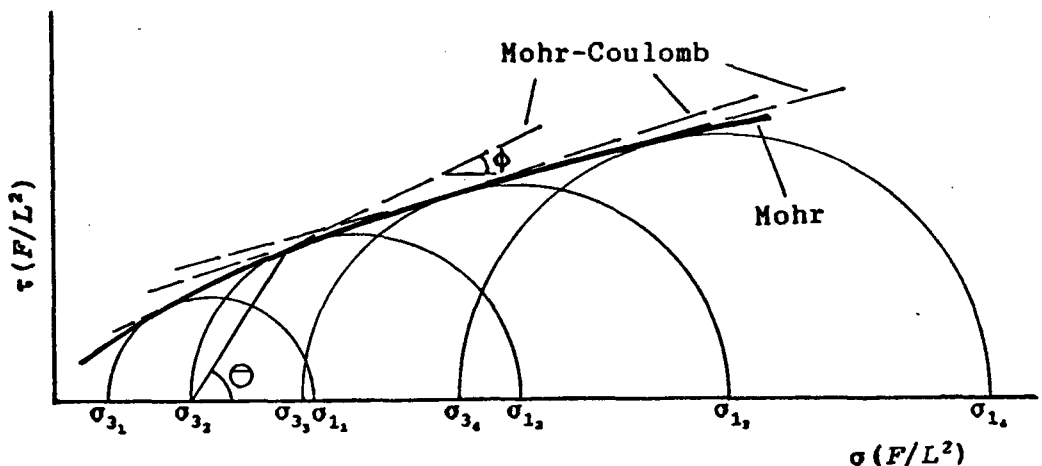


FIGURA 27 - Círculos de Mohr definindo trajetória de tensões de fratura de Mohr e trajetórias de tensões de fratura de Mohr-Coulomb.

Verifica-se, experimentalmente, que mesmo a trajetória de tensões de fratura dada pela equação de Mohr-Coulomb não é retilínea quando  $\sigma_3$  e  $\sigma_1$  crescem, sendo sim uma curva de declividade decrescente. Essa curva em decréscimo de inclinação, que deve ser vista como uma seqüência de segmentos de retas com inclinações decrescentes, implica intersecções crescentes, ou seja, coesividade crescente com o crescimento dos valores de  $\sigma_1$  e  $\sigma_3$ . Decorre daí uma óbvia relação de dependência entre o valor estimado da coesividade  $c$  do solo e tensões  $\sigma$  a ele aplicadas, especialmente em valores relativamente mais baixos de tensões.

Quando o solo é rompido por compressão vertical sem confinamento ( $\sigma_3=0$ ), o que só é possível com solo coesivo, a solução clássica para as relações entre as tensões principais  $\sigma_1$  e  $\sigma_3=0$  resulta de um único par de coordenadas  $\sigma$  e  $\tau$ , com conseqüente  $\phi=\theta$ , donde  $\theta=45^\circ$ ,  $\tau=\sigma_1/2=\sigma=c$ . No entanto, não há razões para que as relações que tornam o valor estimado da coesividade  $c$  dependente dos valores dos pares  $\sigma_1$  e  $\sigma_3$  deixem de existir quando  $\sigma_3$  seja próxima de zero. E, pode-se mesmo propor, com base no item 5.1, que para solos coesivos, aquela dependência entre coesividade e tensão exista mesmo quando  $\sigma_3$  entendida como tensão positiva for igual a zero. Ou seja, em tese, deve manter-se uma relação de dependência entre a coesividade  $c$  estimada e  $\sigma_1$ , mesmo num processo de fratura por compressão simples.

A relação temporal existente na expressão da coesividade vista em 5.1 e 5.2 permite, portanto, considerar

que, além da relação de dependência entre  $\sigma_1$  e coesividade estimada por Mohr-Coulomb, exista uma relação temporal para essa própria dependência.

Tem sido comum a incorporação de conceitos ou expressões clássicas de mecânica do solo na investigação de comportamento do solo agrícola trafegado. No entanto, não parece ter sido suficientemente observado, que esses conceitos ou expressões como instrumentos e o comportamento do solo como objeto de estudo, precisam ser compatíveis frente não apenas à natureza e composição do solo, mas também à temporalidade e à magnitude relativa entre as tensões e deformações ocorrentes. Enquanto na mecânica clássica toma-se o solo como um sistema macroscopicamente homogêneo e normalmente aplicam-se tensões elevadas e resultam deformações relativamente pequenas ou pelo menos em processo mais lento, em solo agrícola as tensões médias são baixas e as deformações são rápidas, grandes ou mesmo semi-infinitas, além de periódicas.

Na medida que as tensões ocorrentes são baixas, a importância da coesividade em determinar  $\tau$  aumenta em relação à importância de  $\sigma$ . Portanto, em relações tensão-deformação de solo agrícola, a dinâmica da resistência do solo tende a ser altamente dependente não apenas das tensões, mas também da coesividade que, como vimos, tem sua própria dinâmica e relações de dependência, em especial as temporais.

Restritamente à compressão simples e considerando o

conceito mais dinâmico de coesividade em termos de tempo e em termos de relações tensão-deformação em sistema macro-particulado, expressões de resistência do solo análogas a  $\tau = c + \sigma_v \tan \phi$  podem ser apresentadas, desde que as seguintes pressuposições possam ser aceitas:

a) uma amostra de solo coerente pode permanecer com forma cilíndrica, mesmo sob determinadas tensões verticais  $\sigma_v$  e sem tensões horizontais  $\sigma_h$  confinantes;

b) num processo de fratura por compressão simples, a coesividade do solo pode ser tomada, por analogia de efeitos, como uma "tensão confinante";

c) a coesividade original pode ser traduzida pelo produto  $A_{ceo} \cdot S_o$  e pode ser estimada por tração como em 3.1 e, com o tempo, agrega-se a ela um produto  $[A_{ceo} S_o](t)$ ;

d) quaisquer tensões normais verticais  $\sigma_v$  aplicadas à amostra, mesmo sem levá-la à fratura, implicam geração de tensões cisalhantes  $L(\sigma_v)$ , com módulo  $0 < L(\sigma_v) \leq \sigma_v/2$ , analogamente ao que é proposto em 3.2;

e) quando a coesividade é estimada por processos compressivos, como na mecânica do solo clássica, agrega-se a  $A_{ceo} \cdot S_o$  um produto  $[A_{ce} S](\sigma_v)$ , também conforme 3.2.

Propõe-se, então:

$$d\tau/dt = c(t) + \sigma_v \tan \phi$$

$$dT/dt = \{A_{ceo} \cdot S_o + \Delta[A_{ceo} \cdot S_o](t)\} + T \cdot \tan \phi$$

$$dR/dt = \{A_{ceo} \cdot S_o + \Delta[A_{ceo} \cdot S_o](t) + \Delta[A_{ce} S](\sigma_v)\} + \sigma_v \tan \phi$$

em que T é a tração aplicável; R é a resistência à compressão;  $\sigma_v$  é a tensão principal vertical e;  $\phi$  é agora um

coeficiente cinético de propensão à expressão de coesividade, expressa no produto Ace.S.

As trajetórias de tensão-tempo de fratura para cada expressão são apresentadas na Figura 28.

Referente a  $\tau$  e R, em que a ambas agrega-se o efeito de  $\Delta[AceS](\sigma_v)$  associado ao método compressivo, as diferenças entre as trajetórias não são reais em termos de valores das relações tensão-deformação-resistência ocorrentes, mas apenas em termos de interpretação de resultados. Ocorre que na obtenção de  $\tau$  em um dado e isolado momento, a adoção de um único valor de  $\sigma_3$ , seja o classicamente considerado igual a zero ou seja igual à própria coesividade, como se propõe na página anterior, implica solução em que se toma  $\phi$  estático e igual a 0. Para  $\phi=0$ , vimos que  $\theta=45^\circ$  e a trajetória tangente é horizontal, decorrendo que  $\tau$ , tomada como a intersecção da ordenada, resulta superior ao que resultaria se  $\phi>0$ .

Portanto, para contemplar as relações temporais entre tensões e resistência do solo, não basta estimar-se  $\tau$  em tempos crescentes, se a interpretação for a tradicionalmente associada à equação.  $\tau$  estaria sendo superestimada pela resistência decorrente de  $\Delta[AceS](\sigma_v)$  e por procedimentos e interpretações de soluções.

T é a expressão da resistência por coesividade, isenta dos efeitos do método que a estima. Como aqui apenas forças tratoras unidirecionais são aplicadas, os correspondentes e análogos valores de  $\sigma_3$  e  $\sigma_1$  são tais que



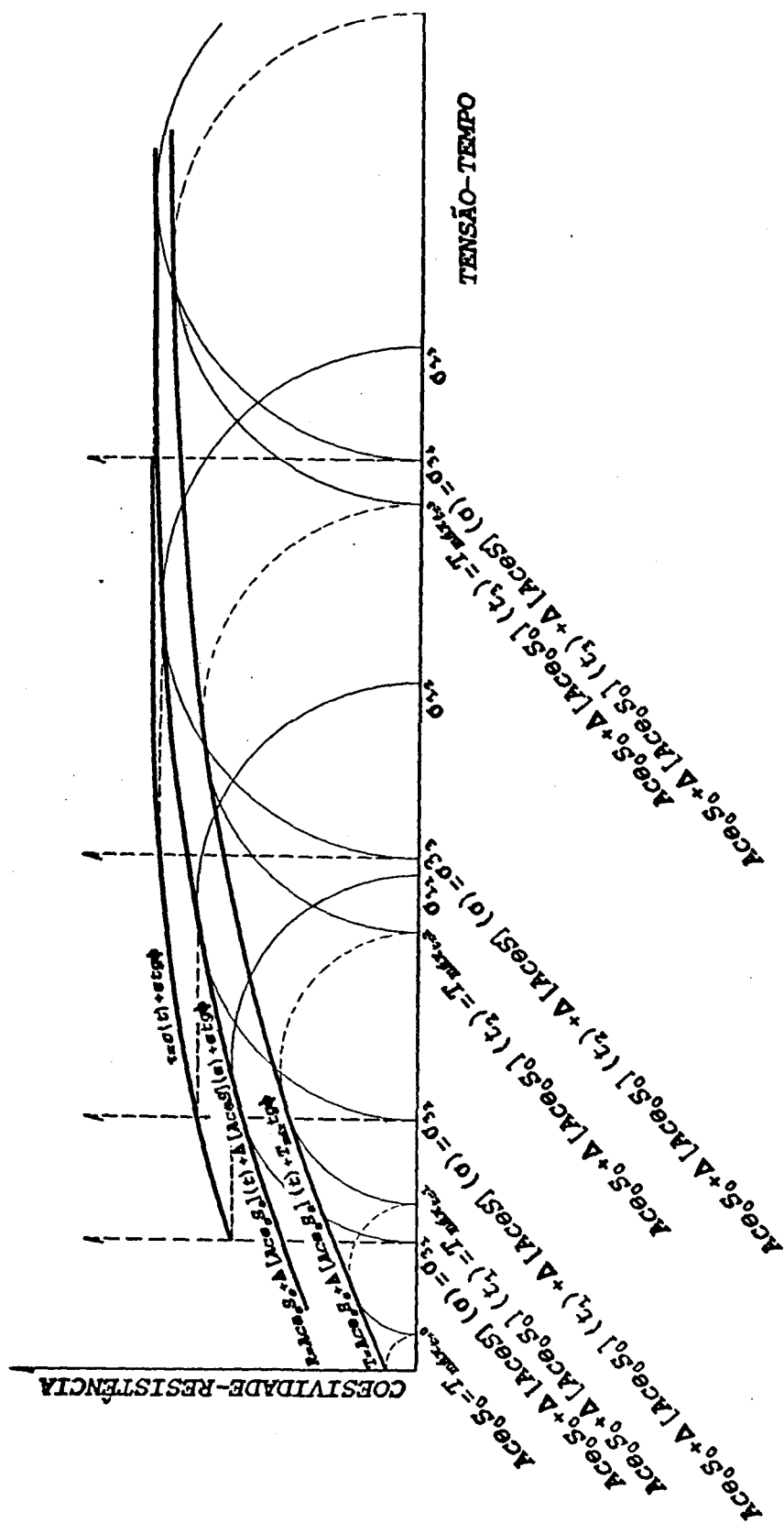


FIGURA 28 - Curvas análogas à trajetória de tensões de fratura de Mohr-Coulomb, quando relações tensão-deformação e temporais da coesividade do solo são consideradas.

$(\sigma_1)_{t-1} = (\sigma_3)_t$  para todos os valores de  $t$ , em que  
 $(\sigma_1)_{t-1} = T_{\text{máx}} \quad t=t-1$  e  $(\sigma_3)_t = T_{\text{máx}} \quad t$ .

Lembrando que as diferenças de trajetórias de tensões-tempo de fratura entre  $\tau$  e  $R$  são de natureza interpretativa e, de  $R$  para  $T$  decorrem de  $\Delta[AceS](\sigma_v)$ , é fundamental também lembrar, que  $\Delta[AceS](\sigma_v)$  mantém dependência de  $\Delta[AceoSo](t)$ . Em 5.1 vimos que o enrijecimento do sistema por esse último incremento de produto tende a diminuir a importância relativa de  $\Delta[AceS](\sigma_v)$  pela limitação de  $\Delta Ace$ . Ora, como  $\Delta[AceoSo](t)$  é um produto termodinâmico que tende a restringir a expressão de  $\Delta[AceS](\sigma_v)$ , e sendo  $\Delta[AceoSo](t)$  uma função de máximo, existirá um tempo  $t$  em que  $(dT/dt) \approx (dR/dt) \approx (d\tau/dt) \approx 0$ . Nesse tempo, então, a relação

$$\frac{\delta \frac{[d[AceS](\sigma)/d\sigma]_{t=0}}{[d[AceS](\sigma)/d\sigma]_{t>0}}}{\delta t}$$

será próxima de zero, significando  $\phi \approx 0$ . Então, as diferenças entre  $\tau$  e  $R$  decorrentes de interpretação da relação temporal já não ocorreriam mais quando se utilizasse  $\tau = c + \sigma t \phi$ , pois todas as relações então seriam compatíveis à condição de  $\sigma_3$  constante, ainda que diferente de zero. Contudo, permaneceria uma diferença entre os valores de  $T$  e  $R \approx \tau$  mesmo a tempos maiores, pois a ocorrência do subproduto  $\Delta[S](\sigma_v)$ , um efeito de atrito associado ao método compressivo, não seria suprimido pelo enrijecimento do solo.

Concluindo, pode-se propor que, para determinadas

condições de umidade ( $u$ ), temperatura ( $T$ ) e pressão ( $P$ ), a taxa de recuperação de resistência por coesividade é função de  $\phi$ , traduzindo este a propensão e cinética dos mecanismos de cimentação discutidos em 5.2. Então,

$$\frac{d\phi}{dt}_{(u,T,P)} = -k\phi,$$

em que  $k$  é um parâmetro cinético característico do solo. Integrando,

$$\int \frac{d\phi}{\phi} = \int -k dt, \quad \text{ou} \quad \phi(t)_{(u,T,P)} = n \cdot e^{-kt},$$

em que  $n$  é  $\phi(t=0)$ .

Infelizmente  $\phi$  não é diretamente estimável. Mas se  $d\phi/dt$  traduz-se irreversivelmente em coesão  $c(t)$ , que é efeito estimável por tração e também pode ser expresso como

$$\frac{dc}{dt}_{(u,T,P)} = k\phi, \quad \text{ou} \quad c(t)_{(u,T,P)} = m + k\phi t,$$

em que  $m$  é  $c(t \approx 0)$ , pode-se propor que  $\phi(t)$  seja proporcional a  $1/c(t)$ . Substituindo  $\phi(t)$  por  $1/c(t)$ , temos

$$\frac{1}{c(t)_{(u,T,P)}} = \frac{1}{m} \cdot e^{-kt}$$

Procedendo fraturas por tração como em 3.2, pode-se obter a coesividade inicial  $m$  em tempo  $t \approx 0$  e coesividade  $c(t)$  em  $t > 0$ , permitindo estimar  $k$  e o tempo para  $[1/c(t)] \approx 0$ , este correspondendo ao tempo para  $\phi(t) \approx 0$ .

Pode-se, portanto, estimar o tempo necessário, após dado condicionamento de cada condição de agregados do solo,

em que praticamente não mais ocorreriam reorientação de partículas e outros possíveis mecanismos de efeito cimentante entre os agregados. Nesse tempo, então, seria adequado adotar a expressão ou mesmo a interpretação clássica da equação  $\tau = c + \sigma \tan \phi$ , se os efeitos do tempo são de interesse em relações tensão-deformação-resistência de solo estruturado e sujeito a fragmentações e recarregamentos.

## 7. CONCLUSÕES

- Incrementos de coesividade entre agregados de solo com o tempo são mais intensos quando há razões para um maior grau de orientação de partículas na região em contato. A reorientação dessas partículas, estabelecendo relações força/superfície de efeito cimentante, é o mais provável mecanismo responsável pelo aumento da coesividade com o tempo, quando mantidas constantes as condições de temperatura e umidade;

- A capacidade do solo em absorver e transformar energia compressiva em resistência coesiva, ou a variação dessa capacidade com o tempo, não é função apenas das características dos agregados sob compressão, mas também da magnitude de prévias tensões compressivas nos contatos entre agregados, que afetaram o grau de orientação de partículas nesses contatos.

- A cinética dos mecanismos responsáveis pela coesividade é quantitativamente estimável a partir de valores de coesividade no tempo  $t = 0$  e num tempo  $t > 0$ .

## 8. BIBLIOGRAFIA CITADA

- BHAT, K.K.S.; NYE, P.H. 1973. Diffusion of phosphate to plant roots in soil. Quantitative autoradiography of the depletion zone. *Plant and Soil*, Netherlands, 38:161-165.
- CINTRA, F.L.D. 1980. Caracterização do impedimento mecânico em Latossolos do Rio Grande do Sul. Dissertação (Mestrado Agronomia - Solos), Faculdade de Agronomia - UFRGS, Porto Alegre. 89p.
- CULLEY, J.L.B.; LARSON, W.E. 1987. Susceptibility to compression of a clay loam Haplaquoll. *Soil Science Society of American Journal*, Madison, 51:562-567.
- DEXTER, A.R.; HORN, R.; KEMPER, W.D. 1988. Two mechanism for age-hardening of soil. *Journal of Soil Science*, London, 39:163-175.
- DALLA ROSA, A. 1981. Práticas mecânicas e culturais na recuperação de características físicas de solos degradados pelo cultivo - Solo Santo Angelo (Latossolo Roxo Distrófico). Dissertação (Mestrado Agronomia-Solos), Faculdade de Agronomia, UFRGS, Porto Alegre. 138p.
- HARRIS, R.F.; CHESTERS, G.; ALLEN, O.N. 1966. Dynamics of soil aggregation. *Advances in Agronomy*, New York, 18:107-169.
- KEMPER, W.D.; ROSENAU, R.C.; DEXTER, A.R. 1987. Cohesion development in disrupted soils as affected by clay and organic matter content and temperature. *Soil Science Society American Journal*, Madison, 51:860-867
- LAMBE, W. 1951. *Soil testing for engineers*. New York, John Wiley. Cap. V, 165p.

- LARNEY, F.J. & FORTUNE, R.A. 1986. Recompaction effects of moldboard ploughing and seedbed cultivations on four deep loosened soils. *Soil & Tillage Research*, Amsterdam, **8**:77-87.
- MISRA, R.K.; ALSTON, A.M.; DEXTER, A.R. 1988. Root growth and Phosphorus uptake in relation to the size and strength of soil aggregates. I. Experimental Studies. *Soil & Tillage Research*, Amsterdam, **11**:105-116.
- PHILLIPS, R.E.; BROWN, D.A. 1966. Counter diffusion of  $Rb^{86}$  and  $Sr^{86}$  in compacted soil. *Journal of Soil Science*, London, **17**:200-211.
- RAGHAVAN, G.S.V.; McKYES, E.; CHASSE, M.; MERINEAU, F. 1976. Development of compaction patterns due to machinery operation in a orchard soil. *Canadian Journal of Plant Science*, Ottawa, **56**:505-509.
- ROGER, E.G.; BROWNING, G.M. 1948. Factors affecting the stability of soil aggregates. *Soil Science Society American Proceeding*, Madison, **12**:51-55.
- TAYLOR, J.H.; GILL, W.R. 1984. Soil compaction: state-of-the-art report. *Journal of Terramechanics*, London, **21**:195-213.
- TERPSTRA, R. 1989. Formation of new aggregates under laboratory simulated field conditions. *Soil & Tillage Research*, Amsterdam, **13**:13-21.
- UTOMO, W.H.; DEXTER, A.R. 1981a. Effect of ageing on compression resistance and water stability of soil aggregates disturbed by tillage. *Soil & Tillage Research*, Amsterdam, **1**:127-137.
- UTOMO, W.; DEXTER, A.R. 1981b. Age-hardening of agricultural soils. *Journal of Soil Science*, London, **32**:335-350.
- VOORHEES, W.B. 1983. Relative effectiveness of tillage and natural forces in alleviating wheel-induced soil compaction. *Soil Science Society American Journal*, Madison, **47**:129-133.
- VOORHEES, W. B.; LINDSTROM, M. J. 1984. Long-term effects of tillage method on soil tilth independent of wheel traffic compaction. *Soil Science Society American Journal*, Madison, **48**:152-156.

## 9. APÊNDICES



Apêndice 1 - Tensões de tração máxima aplicável ( $\text{gf/cm}^2$ ) em unidades com agregados originados na fratura de solo compactado às densidades de  $D_{s1}$ ,  $D_{s2}$ ,  $D_{s3}$  e agregados não compactados (NA), em função do tempo e tensões de condicionamento  $N_1$  e  $N_2$ .

-----					
T e m p o (dia)					
-----					
	0*	1	6	14	28
-----					
NAN <sub>1</sub>	4,5±2,2	5,9±0,4	8,4±1,4	9,3±1,0	10,3±1,1
NAN <sub>2</sub>	9,8±1,1	11,2±2,0	15,5±0,5	18,3±2,8	22,5±3,2
.					
D <sub>s1</sub> N <sub>1</sub>	3,6±0,6	4,4±1,3	4,2±2,5	6,9±1,8	8,6±3,0
D <sub>s1</sub> N <sub>2</sub>	10,7±2,2	11,7±2,2	12,7±1,6	15,8±2,3	19,4±3,1
D <sub>s2</sub> N <sub>1</sub>	4,5±1,3	5,3±2,0	4,9±0,7	6,0±1,8	8,7±2,0
D <sub>s2</sub> N <sub>2</sub>	11,1±0,6	13,0±2,5	12,2±1,0	19,2±4,5	26,7±1,7
D <sub>s3</sub> N <sub>1</sub>	2,8±0,8	4,4±0,9	4,7±0,4	8,9±3,0	11,1±3,1
D <sub>s3</sub> N <sub>2</sub>	10,0±1,1	13,2±2,8	14,2±3,4	17,6±1,7	22,2±2,8
-----					

D<sub>s1</sub>=1,73 g/cm<sup>3</sup>

D<sub>s2</sub>=1,88 g/cm<sup>3</sup>

D<sub>s3</sub>=1,82 g/cm<sup>3</sup>

N<sub>1</sub> =0,20 kgf/cm<sup>2</sup>

N<sub>2</sub> =0,50 kgf/cm<sup>2</sup>

Os dados são média e desvio padrão de 5 repetições.

\* aproximadamente 2 minutos após o condicionamento.

Apêndice 2 - Tensões compressivas de fratura ( $\text{gf/cm}^2$ ) em unidades com agregados originados de solo compactado às densidades  $D_{s1}$ ,  $D_{s2}$ ,  $D_{s3}$  e agregados não compactados (NA), em função do tempo após condicionamento confinado a tensão de  $0,20 \text{ kgf/cm}^2$

-----					
T e m p o (dia)					
-----					
	0*	1	6	14	28
-----					
NA	$71,0 \pm 3,0$	$66,0 \pm 4,6$	-----	$73,4 \pm 3,1$	$77,4 \pm 2,5$
$D_{s1}$	$69,7 \pm 2,6$	$71,3 \pm 1,5$	$71,4 \pm 1,5$	$77,5 \pm 2,0$	$84,7 \pm 4,1$
$D_{s2}$	$68,4 \pm 2,6$	$79,0 \pm 9,0$	-----	$89,8 \pm 6,2$	$104,1 \pm 5,4$
$D_{s3}$	$89,8 \pm 2,2$	$92,9 \pm 2,1$	$94,7 \pm 2,0$	-----	$102,3 \pm 3,7$
-----					

$D_{s1} = 1,73 \text{ g/cm}^3$

$D_{s2} = 1,88 \text{ g/cm}^3$

$D_{s3} = 1,82 \text{ g/cm}^3$

Os dados são média e desvio padrão de 5 repetições.

\* aproximadamente 2 minutos após o condicionamento.